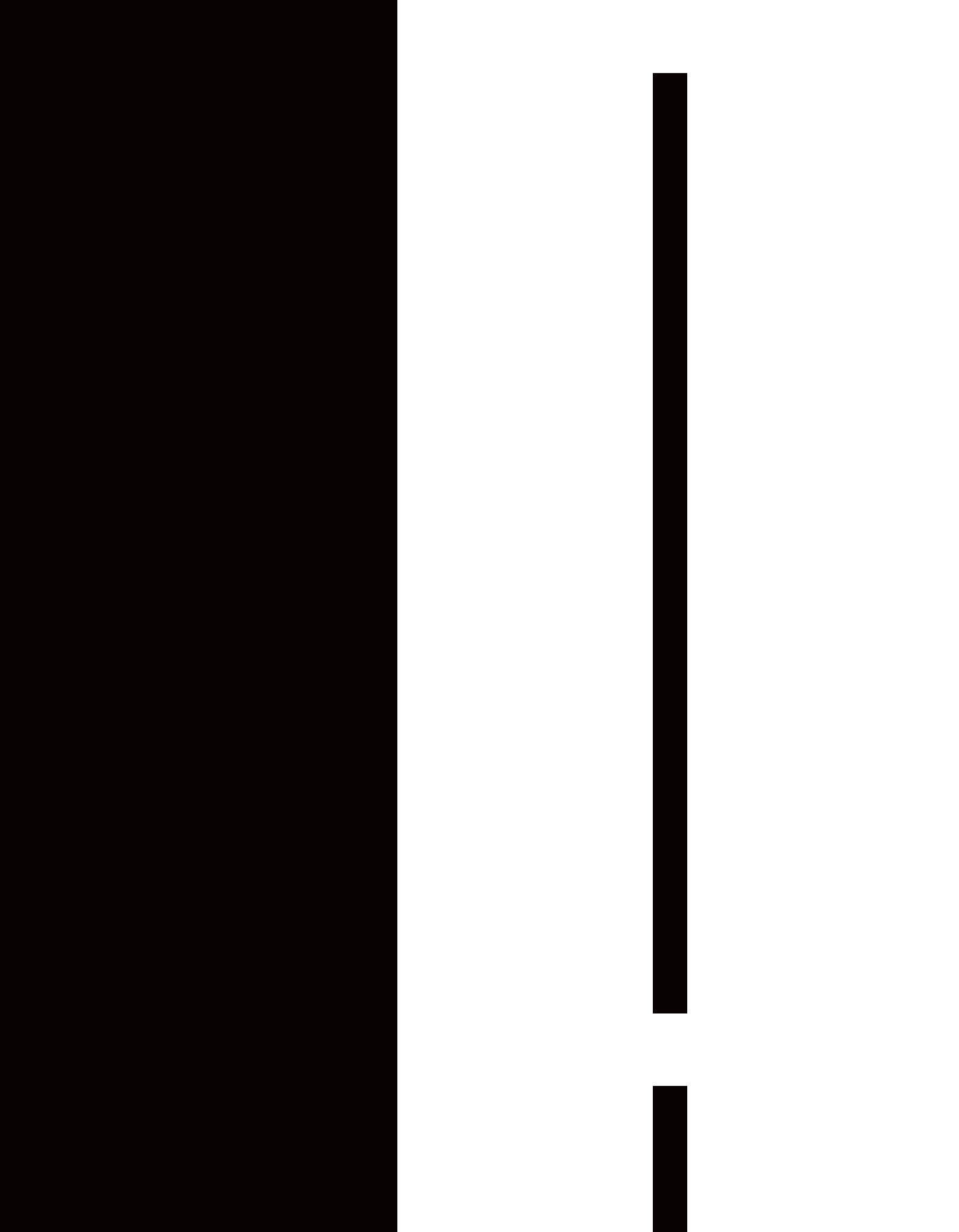


[estremi]

anno 8 numero **15** / 10.13

asimmetrie

rivista semestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare



asimmetrie

Cari lettori di Asimmetrie,

la domanda alla quale la fisica delle particelle tenta di rispondere è semplice e affascinante, ma provoca un senso di vertigine: che cosa è successo dopo il Big Bang tredici miliardi e mezzo di anni fa? Ma non con l'approssimazione di un milione, di mille o di cento anni e, neanche, con quella di un minuto o un secondo. No, che cosa è successo un miliardesimo di miliardesimo di miliardesimo di secondo dopo il Big Bang! In quell'attimo è già scritto il destino del nostro universo. Converrete che la domanda è estrema assai. Per arrivare a conoscere che cosa è successo un millesimo di miliardesimo di secondo dopo il fatale inizio abbiamo dovuto costruire una macchina, il Large Hadron Collider, che è il luogo più freddo dell'universo e dove le collisioni in un minuscolo punto raggiungono la temperatura più alta dell'universo.

Anche i raggi cosmici sono uno strumento potentissimo di conoscenza dei fenomeni che avvengono nei luoghi più violenti dell'universo, ma l'atmosfera li degrada e li riduce a muoni, quindi dobbiamo salire sopra l'atmosfera con i nostri satelliti artificiali per esplorarli. Tuttavia, i muoni prodotti dai loro urti con l'atmosfera arrivano fino a terra e penetrano considerevolmente nel suolo e nel mare.

Perciò, per schermarli e poter studiare così le rarissime interazioni dei neutrini, siano essi provenienti dalle profondità del cosmo o prodotti nella trasformazione dei nuclei, bisogna fare esperimenti nelle profondità delle miniere, nei trafori autostradali che bucano le montagne e negli abissi del mare. Estrema la domanda, estremi gli strumenti.

Fernando Ferroni
presidente Infn



asimmetrie

Rivista dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Semestrale, anno 8,
numero 15 ottobre 2013

direttore responsabile

Fernando Ferroni, *presidente Infn*

direttore comitato scientifico

Egidio Longo

comitato scientifico

Vincenzo Barone
Massimo Pietroni
Giorgio Riccobene
Barbara Sciascia

caporedattore

Catia Peduto

redazione

Eleonora Cossi
Vincenzo Napolano
Francesca Scianitti
Antonella Varaschin
Francesca Cuicchio
(infografica)

hanno collaborato

Fabio Bellini, Eugenio Coccia, Paolo De Bernardis, Pasquale Di Nezza, Piera Luisa Ghia, Giovanni Organtini, Elisa Resconi

contatti redazione

Infn Ufficio Comunicazione
piazza dei Caprettari 70
I-00186 Roma
T +39 06 6868162
F +39 06 68307944
comunicazione@presid.infn.it
www.infn.it

impaginazione

Istituto Arti Grafiche Mengarelli

stampa

IAG Mengarelli

su carta di pura cellulosa
ecologica ECF
Fedrigoni Symbol™ Tatami
250 - 135 g/m²

Registrazione del Tribunale di Roma
numero 435/2005 del 8 novembre 2005.
Rivista pubblicata da Infn.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte della rivista può essere riprodotta, rielaborata o diffusa senza autorizzazione scritta dell'Infn, proprietario della pubblicazione.

Finita di stampare nel mese di settembre 2013.
Tiratura 15.000 copie.

come abbonarsi

L'abbonamento è gratuito.

Tre modi per abbonarsi:

Compilare l'apposito form sul sito
www.asimmetrie.it

Inviare una mail di richiesta a
comunicazione@presid.infn.it

Contattare la redazione

sito internet

Asimmetrie 15 e tutti i numeri
precedenti della rivista sono disponibili
anche online su www.asimmetrie.it

crediti iconografici

Foto copertina squamishclimbingsource.com/
// foto p. 4 (stock.XCHNG); foto a p. 5 ©Stijn Buitnik, IceCube Collaborator; figg. b, c pp. 6-7 ©Asimmetrie-Infn; foto d p. 8 ©NASA/MPIA/ Calar Alto Observatory, Oliver Krause et al. // fig. a p. 10 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 11 ©Lorenzo Caccianiga; fig. b p. 12 ©Carlo Morello; foto b p. 12 ©Piera Ghia; foto d p. 13 ©Arnaud Blin; foto e p. 14 ©Alessandro Corvaglia // foto a p. 15 ©ESO/L. Calçada; foto b p. 17 ©Infn // foto p. 18 ©Carlos Pobes // fig. a p. 20 ©Asimmetrie-Infn; foto b p. 21 ©Cern; foto c p. 22 ©Cern // foto a p. 23 ©Cern; fig. 1 p. 24 ©Asimmetrie-Infn; fig. b p. 25 ©Cern // fig. a p. 27 ©Asimmetrie-Infn; foto b p. 28 ©CUORE Collaboration; foto 1 p. 29 ©Infn // fig. a p. 30 ©NASA/Tod Strohmayer (GSFC)/Dana Berry (Chandra X-Ray Observatory; foto b p. 32 ©Infn, S. Schiavon // fig. a p. 33 ©Asimmetrie-Infn; fig b p. 34 ©Asimmetrie-Infn; fig. c p. 35 ©Agenzia Spaziale Europea, collaborazione Planck; fig. 1 p. 36 ©Asimmetrie-Infn // fig. a p. 37 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 38 ©mrhdwallpaper.com; fig. b p. 39 ©Asimmetrie-Infn; fig. 1 p. 40 ©Asimmetrie-Infn // foto a p. 42 ©Science Museum/Science & Society Picture Library; foto b p. 43 ©Österreichische Nationalbibliothek // foto a p. 48 ©Giovanni Organtini.

Ci scusiamo se, per cause del tutto indipendenti dalla nostra volontà, avessimo ommesso o citato erroneamente alcune fonti.

as

15 / 10.13

[estremi]

Ai confini della realtà

di Massimo Pietroni

4

[as]

Dove osano le particelle.
di Giorgio Riccobene

10

A spasso per la Pampa

di Piera Luisa Ghia

11

Dal cosmo agli abissi

di Elisa Resconi

15

[as]

Il giorno più lungo della mia vita.
di Francesca Scianitti

18

Brodo primordiale

di Pasquale Di Nezza

20

Il fascino dell'impossibile

di Barbara Sciascia

23

Assenti giustificati

di Fabio Bellini

27

Note gravi

di Eugenio Coccia

30

Foto d'epoca

di Paolo De Bernardis

33

[as]

Crescita in tempi di inflazione.
di Massimo Pietroni

37

Scale di valori

di Vincenzo Barone

38

[as] spazi

Lo specchio magico.
di Eleonora Cossi

41

[as] radici

Cacciatori di eclissi.
di Eleonora Cossi

42

[as] riflessi

Voci dal profondo.
di Antonella Varaschin

44

[as] traiettorie

Il fisico che viene dal mare.
di Vincenzo Napolano

46

[as] illuminazioni

Particelle nella nebbia.
di Giovanni Organtini

48

Ai confini della realtà

Fisici all'esplorazione degli estremi

di Massimo Pietroni



“Alla frontiera della conoscenza, alla frontiera della tecnologia”: potrebbe essere questo lo slogan per promuovere le ricerche dei fisici. L'aspirazione a una comprensione sempre più profonda della natura e delle sue leggi, infatti, spinge i ricercatori a esplorare le regioni estreme dello spazio e del tempo: le distanze più piccole e le energie più elevate, le epoche più vicine al Big Bang e più lontane da noi, i fenomeni più rari. La localizzazione di questi estremi non è data una volta per tutte, ma muta e si ridefinisce di continuo, sulla spinta dello sviluppo tecnologico e del raffinamento delle strategie della ricerca.

Questa rincorsa continua punta a esplorare, superandoli, gli estremi della tecnologia. È quello che avviene per esempio al Cern, a Ginevra, dove si trova l'acceleratore di particelle in grado di produrre le collisioni più energetiche mai realizzate, il Large Hadron Collider (Lhc). Oppure, nei laboratori per la

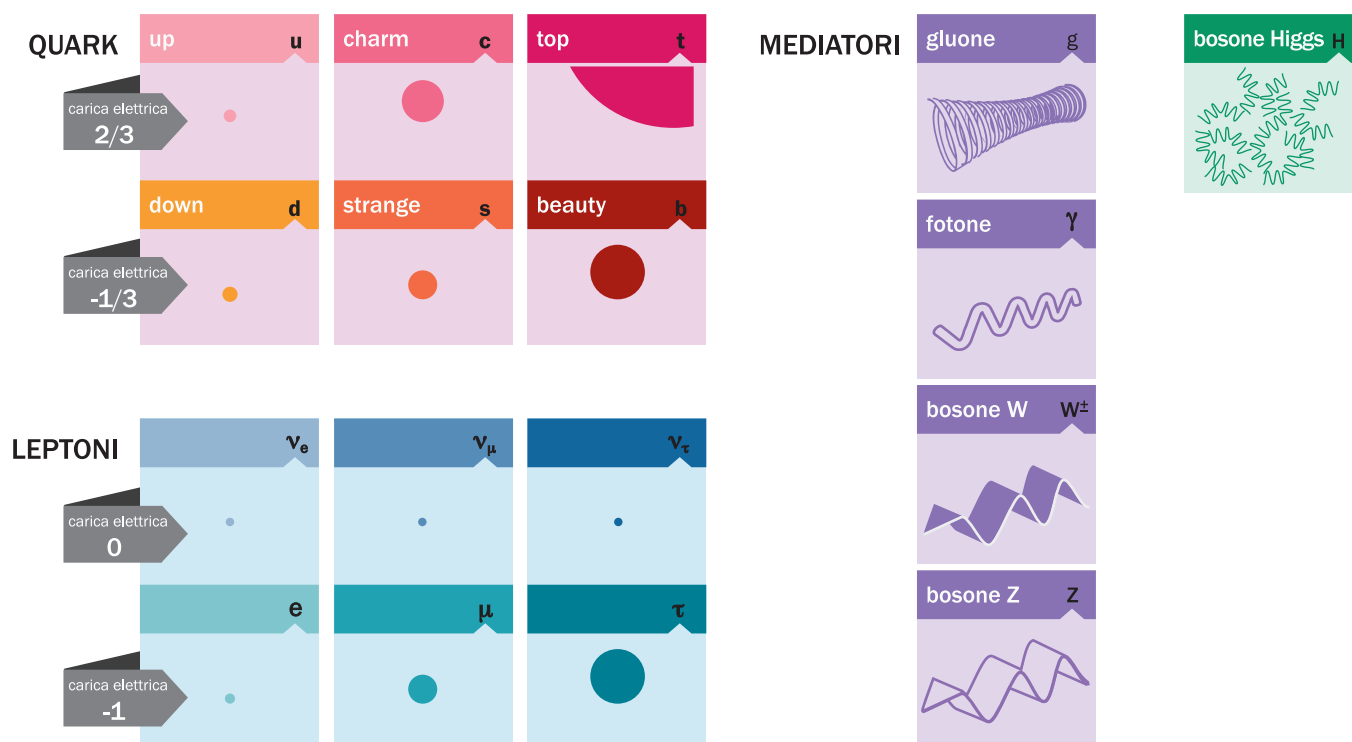
ricerca delle onde gravitazionali (le perturbazioni dello spaziotempo predette dalla relatività generale di Einstein, ancora mai osservate direttamente) dove si riescono a monitorare movimenti infinitesimali di apparati sperimentali delle dimensioni di diversi chilometri (vd. p. 30).

Spesso, la ricerca dell'estremo tecnologico è accompagnata dalla necessità di lavorare in condizioni estreme anche dal punto di vista geografico e logistico. Per esempio, la necessità di ridurre al minimo i fattori di disturbo esterno per osservare segnali sempre più tenui (come quelli degli elusivi neutrini) spinge a realizzare gli esperimenti sotto terra, come avviene al laboratorio del Gran Sasso dell'Infn, oppure in cima alle montagne o nello spazio (vd. p. 10). In altri casi, ad esempio per studiare i raggi cosmici di altissima energia, si sfruttano risorse naturali (masse d'acqua o di ghiaccio, o l'atmosfera stessa) come rivelatori

a.

L'esperimento IceCube, che si trova a meno di un chilometro dal Polo Sud, è il più grande rivelatore di neutrini esistente (vd. p. 17). I neutrini vengono rivelati visualizzando le tracce lasciate in un volume di un chilometro cubo di ghiaccio.





di particelle, e a questo fine si costruiscono esperimenti migliaia di metri sotto la superficie del mare, sotto i ghiacci dell'Antartide o nella pampa argentina (vd. pp. 11 e 15).

La progettazione di esperimenti per esplorare i confini dello spazio e del tempo non procede alla cieca, ma è guidata da una sorta di "mappa delle conoscenze", che fornisce punti di riferimento stabili e al tempo stesso indica le direzioni più promettenti. Questa mappa, oggi, è data dall'unione tra due teorie di grande successo, tanto da essere chiamate "standard": il *modello standard delle particelle elementari* e il *modello cosmologico standard*. Il primo descrive le interazioni tra particelle elementari, il secondo, l'universo a grande scala. Entrambi i modelli presentano alcuni aspetti ben consolidati, che possiamo paragonare alle regioni meglio conosciute di un certo territorio, e altri conosciuti con precisione inferiore o ancora in attesa di una conferma sperimentale, che corrispondono ai territori ancora poco esplorati, per cui la mappa è poco dettagliata, incompleta o, forse, persino sbagliata.

Le regioni note della mappa delle conoscenze sono di fondamentale importanza: stabiliscono punti di riferimento affidabili per orientarsi nell'esplorazione, sia sperimentale che teorica, delle regioni meno conosciute, ed è per questo che lo sforzo di studiarle sempre meglio è una componente fondamentale dell'impresa scientifica.

Così, nel caso del modello standard delle particelle, i settori noti con gran precisione sono quelli relativi all'elettromagnetismo e alle interazioni deboli fra quark e leptoni, che vengono descritti in modo unificato tramite la teoria *elettrodebole*. Per fare un esempio, questa teoria consente di calcolare alcune grandezze fisiche con una precisione fino a una parte su

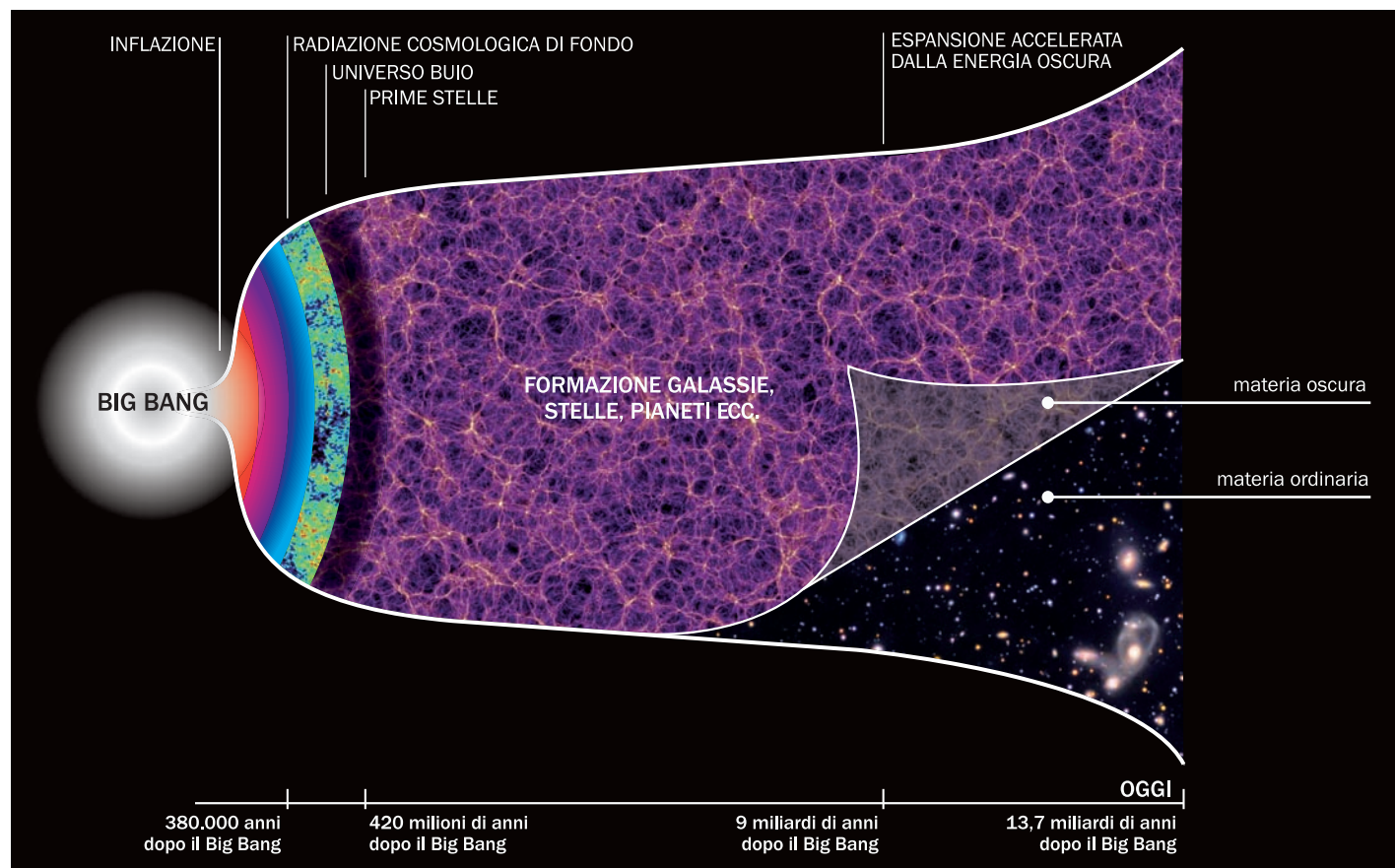
b.
I costituenti fondamentali della materia secondo il modello standard delle particelle.

un miliardo, e di confrontarle con successo con esperimenti allo stesso livello di accuratezza. Questo dimostra che la struttura base della teoria, che si fonda sulla meccanica quantistica e sulla relatività ristretta, è compresa molto bene.

Nel caso del modello standard cosmologico, la radiazione cosmica di fondo, recentemente misurata con altissima precisione dal satellite Planck, ci fornisce informazioni estremamente dettagliate sullo stato dell'universo 380.000 anni dopo il Big Bang (vd. p. 33). Ad oggi, le osservazioni sono in accordo con l'ipotesi fondativa del modello, ossia quella di un universo governato dalla teoria della relatività generale di Einstein su tutte le scale osservabili e che è evoluto, attraverso l'espansione, da uno stato molto caldo e denso fino allo stato attuale. Un altro pilastro di questo modello è la *nucleosintesi primordiale* (vd. fig. a p. 20), ossia la spiegazione del meccanismo attraverso il quale, un secondo dopo il Big Bang, si sono formati i primi nuclei leggeri (deuterio, trizio, elio, litio).

Per accedere alle regioni ignote della mappa delle conoscenze si fa ricorso a diverse strategie. Una di queste si muove nella direzione delle "energie elevatissime". Particelle ad altissima energia possono essere studiate sfruttando gli acceleratori di particelle naturali presenti nell'universo, come quelli che danno origine ai raggi cosmici e ai *lampi di raggi gamma* (vd. pp. 11 e 15). Sulla Terra, invece, la frontiera è oggi l'acceleratore di protoni Lhc. Il bosone di Higgs, appena trovato, ha aperto la porta alla comprensione diretta del meccanismo attraverso cui vengono date le masse alle particelle elementari (vd. Asimmetrie n. 14).

c.
Rappresentazione schematica dell'evoluzione dell'universo secondo il modello standard cosmologico. Nel lembo superiore è rappresentata la distribuzione di materia oscura ottenuta da simulazioni al computer. I primi minuti dell'universo sono raffigurati in fig. a p. 20.



Questo settore della teoria, però, presenta numerosi “parametri liberi”, ossia quantità che non vengono spiegate dal modello ma che possono, al momento, essere conosciute solo per via sperimentale. Di conseguenza, dobbiamo ancora capire, ad esempio, perché le masse di leptoni e quark sono così diverse tra loro. Inoltre il valore della massa dello stesso bosone di Higgs è molto probabilmente legato a qualche struttura fisica ancora non nota, operativa a energie più elevate. Le interazioni forti, che insieme a quelle elettrodeboli vengono descritte dal modello standard delle particelle, sono responsabili della formazione di protoni e neutroni a partire dai quark. Questo processo, ancora poco noto, viene studiato dall’esperimento Alice, sempre in Lhc, e consente di esaminare la materia in condizioni simili a quelle prossime al Big Bang, quando l’universo passò da uno stato in cui i quark erano liberi allo stato attuale, in cui questi sono “confinati” all’interno di protoni e neutroni (vd. p. 20).

Ma a volte, per trovare il nuovo non bisogna necessariamente spingersi molto lontano. Esplorando con grande accuratezza territori noti possiamo trovare un indizio poco appariscente, ma che ci conduce alla scoperta di una città sotterranea, proprio sotto i nostri piedi (vd. approfondimento p. 24). Questa

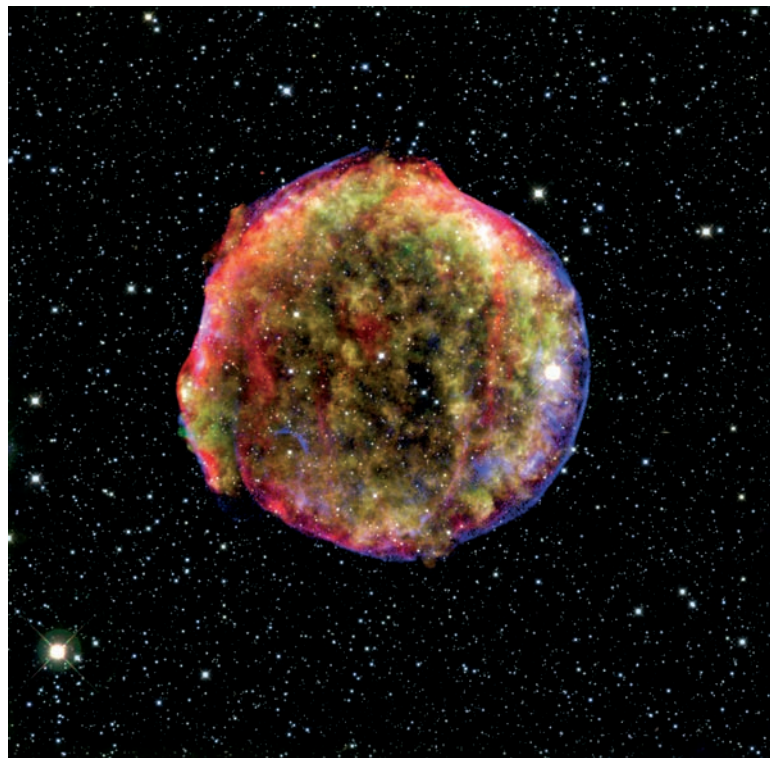
strategia è alla base delle ricerche che studiano gli “eventi rari”. Nel modello standard alcuni processi fisici sono del tutto proibiti o hanno bassissime probabilità di verificarsi. Se questi processi vengono osservati con frequenza più alta di quella prevista dal modello, significa che esiste una nuova struttura fisica responsabile di questo eccesso di eventi anomali. In questo caso, la nuova fisica viene messa in luce senza dover raggiungere le energie elevatissime necessarie alla produzione di nuove particelle.

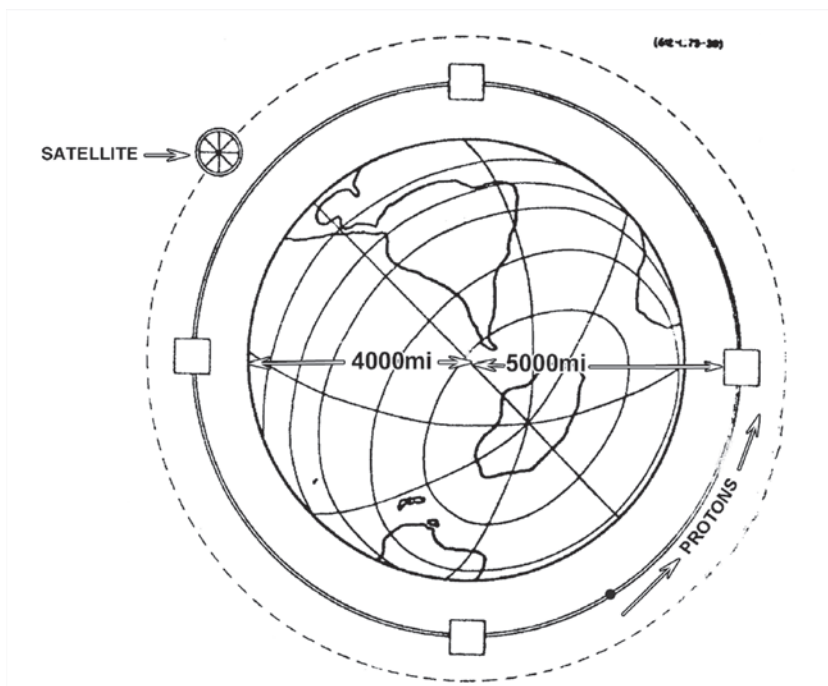
Questa strategia è quella seguita, per esempio, nel recente studio del decadimento del mesone B_s in due muoni, un evento rarissimo per il modello standard, e nella ricerca del decadimento di un muone in un elettrone e in un fotone (vd. p. 23) o del decadimento doppio beta senza neutrini (vd. p. 27), proibiti dal modello standard delle particelle.

Informazioni preziose ci verranno poi fornite osservando il cosmo, forse dalle onde gravitazionali prodotte da eventi astrofisici estremi, come l’esplosione di una supernova che ha portato alla formazione di una stella di neutroni o di un buco nero (vd. Asimmetrie n. 14 p. 33), o da quelle prodotte ancora prima, nell’epoca più misteriosa dell’evoluzione dell’universo, cioè l’*inflazione* (vd. p. 37).

d.

Il resto dell’esplosione della supernova di Tycho Brahe (immagine in falsi colori composta da misure a raggi X e raggi infrarossi).





e.
L'acceleratore "definitivo"
illustrato per gioco da Enrico
Fermi all'assemblea della
American Physical Society nel
1954. Il fascio di protoni circola
in un anello in orbita a 1600
chilometri di quota.

Queste onde gravitazionali primordiali potrebbero essere rivelate da analisi ancora più dettagliate della radiazione cosmica di fondo. Quelli descritti fino ad ora sono solo alcuni dei tentativi già in atto di allargare e dettagliare sempre meglio la nostra mappa delle conoscenze. La regione più interessante di questa mappa è quella all'intersezione tra il modello standard delle particelle e quello cosmologico. Lì si trovano alcune delle domande fondamentali della fisica odierna: che cosa c'è oltre i modelli standard? che cos'è la materia oscura (vd. Asimmetrie n. 4)? quale principio fisico governa il valore delle masse delle particelle? che cos'è l'energia oscura? perché l'antimateria è presente nell'universo solo in quantità infinitesime? La risposta ad alcune di queste domande potrà venire nei prossimi anni, da Lhc o da altri esperimenti sulla terra o nello spazio. Per altre, forse, la vera risposta si trova in regioni della mappa così lontane da essere ancora del

tutto ignote, e per cui esistono solo abbozzi più o meno fantasiosi. Però le frontiere si spostano di continuo e questi estremi cambiano con il passare del tempo (vd. p. 38). Le "alte" energie dei primi acceleratori con cui Enrico Fermi studiava le forze nucleari sono milioni di volte più basse delle alte energie raggiunte a Lhc. In una delle sue ultime conferenze Fermi immaginò l'acceleratore definitivo, un anello attorno alla Terra (vd. fig. e). In realtà, l'energia che aveva in mente di raggiungere è di poco superiore a quella che Lhc permette di ottenere oggi con "soli" 27 chilometri di circonferenza. Scoraggiarsi di fronte a queste imprese non è quindi una buona strategia, perché l'esperienza insegna che ostacoli apparentemente insormontabili possono essere superati, o aggirati, spesso in modo imprevedibile a priori, grazie allo sviluppo di nuove soluzioni tecniche e alla comparsa sulla scena della ricerca di nuove menti brillanti e avventurose.

Biografia

Massimo Pietroni è ricercatore dell'Infn della sezione di Padova. In questi ultimi anni si è occupato principalmente del problema della materia e dell'energia oscura nell'universo e delle sue possibili spiegazioni nell'ambito della fisica delle particelle.

Link sul web

<http://www.vialattea.net/cosmo/>

<http://preposterousuniverse.com/writings/cosmologyprimer/index.html>

<http://dspace.library.cornell.edu/retrieve/79/enrico>

[as]

Dove osano le particelle.



a.
Mappa degli esperimenti
in luoghi "estremi".

1. Laboratori Nazionali del Gran Sasso, tunnel autostrada Roma-L'Aquila (Italia)
2. Laboratoire Souterrain de Modane, tunnel Fréjus (Francia)
3. Homestake, miniera (Sud Dakota, Usa)
4. Kamioka Observatory, miniera (Hida, Giappone)
5. Andes-Agua Negra Deep Experiment Site, tunnel nelle Ande (Chile-Argentina)
6. Day Bay Experiment, penisola di Dapeng (Cina)
7. Km3net, abissi marini (a largo della Sicilia, Italia)
8. Baikal Neutrino Telescope, lago Baikal (Russia)
9. IceCube, ghiaccio (Polo Sud)
10. Magic, vulcano La Palma (Isole Canarie, Spagna)
11. Cangaroo, deserto (Australia)
12. Veritas, deserto (Arizona, Usa)
13. Hess, deserto (Namibia)
14. Argo, altipiano del Tibet (Cina)
15. Auger, pampa (Argentina)
16. satellite Fermi, spazio
17. satellite Agile, spazio
18. satellite Pamela, spazio
19. Ams, a bordo della Stazione Spaziale Internazionale



Osservare alcuni fenomeni fisici è un po' come provare a vedere in pieno giorno la luce delle stelle.

Sulla superficie della terra infatti siamo "accecati" dal cosiddetto *rumore di fondo*, che può essere anche milioni di volte più intenso del segnale che cerchiamo. Per questo motivo i ricercatori per fare i loro esperimenti colonizzano luoghi "estremi": si tratta di posti isolati e schermati, lontani da ogni possibile fonte di rumore di origine umana o naturale. Così per studiare i segnali dei neutrini, che si nascondono tra quelli ben più numerosi dovuti ai raggi cosmici, i fisici costruiscono rivelatori sotto enormi montagne, come il Gran Sasso o il Fréjus, o in profonde miniere come nel caso di Homestake nel Sud Dakota (Usa) o Kamioka in Giappone. Nei prossimi anni si spingeranno anche sotto le Ande, usando il tunnel che collegherà Cile e Argentina, e costruiranno un complesso di rivelatori sotterranei nella penisola del

Dapeng in Cina, a 55 chilometri da Hong Kong e a circa cinque chilometri da due centrali nucleari, per studiare i neutrini che questi potenti reattori producono costantemente.

Ancora più "estremi" sono i rivelatori per catturare i neutrini cosmici ultra-energetici installati a migliaia di metri di profondità negli abissi del Mar Mediterraneo (Km3net) e del grande lago Baikal in Siberia (Baikal Neutrino Telescope), o sotto i ghiacci del Polo Sud (IceCube). Ambienti inaccessibili all'uomo, in cui le strutture sono sottoposte a enormi pressioni e bassissime temperature e collegate a terra con particolari cavi contenenti conduttori e fibre ottiche (fig. c p. 17). Per osservare i fotoni gamma di altissima energia (di più di cento miliardi di elettronvolt) emessi dalle sorgenti cosmiche, invece, occorre costruire i rivelatori in altipiani desertici dove il cielo è terso per gran parte dell'anno, come

sul Vulcano Taburiente sull'isola La Palma nell'arcipelago delle Canarie (vd. p. 41), alle pendici del quale è installato il telescopio Magic, o come nei deserti dell'Australia, dell'Arizona e della Namibia, dove operano i telescopi Cangaroo, Veritas e Hess.

Negli enormi e isolati spazi offerti dagli altipiani del Tibet e della pampa argentina, i fisici studiano i raggi cosmici di altissima energia con gli esperimenti Argo e Auger, quest'ultimo esteso quasi quanto la città di Parigi (vd. p. 11). A centinaia di chilometri di altitudine, infine, sofisticati esperimenti installati su satelliti (come Fermi, Agile e Pamela) o sulla Stazione Spaziale Internazionale (come l'esperimento Ams) misurano il flusso dei raggi cosmici "primari" e dei fotoni X e gamma, intercettandoli prima che interagiscano con l'atmosfera terrestre, in modo da mantenere "intatta" l'informazione sulla loro massa, carica ed energia. [Giorgio Riccobene]

A spasso per la Pampa

Un dialogo sui raggi cosmici

di Piera Luisa Ghia

a.
Uno dei 1600 rivelatori
dell'Osservatorio di raggi cosmici
Pierre Auger, nella Pampa Amarilla
in Argentina.



Particelle estremamente minute dotate di altissima energia: sono i *raggi cosmici* e viaggiano nello spazio interstellare a grandissima velocità. La loro origine, ancora misteriosa, è probabilmente dovuta a fenomeni estremi nell'universo. Arrivano sulla Terra dopo aver percorso distanze lunghissime, provenendo dalla nostra galassia o da ancora più lontano. Estremi sono anche gli strumenti usati per studiarli: estremamente sofisticati quelli lanciati nello spazio, estremamente grandi o posizionati ad altitudine estrema quelli sulla Terra. È per tutti questi motivi che i raggi cosmici mi hanno affascinato sin dai tempi della mia tesi di laurea a tal punto che oggi ne sono una studiosa per professione.

È una limpida mattina di sole a Malargue, una cittadina in vista delle Ande, in Argentina. Una giornata ideale per il lavoro che mi aspetta: riparare mezza dozzina dei 1600 rivelatori dell'Osservatorio di raggi cosmici Pierre Auger, nella Pampa Amarilla. Ci vorrà un'oretta di viaggio sulla 4x4 per raggiungere la meta, e l'intera giornata per gli interventi. Ho un ospite speciale oggi: mio figlio sedicenne. Al quart'anno di liceo, mi ha convinto a portarlo qui: "Ora che ho studiato gli atomi e i nuclei, finalmente mi potrai spiegare che cosa sono i raggi cosmici che studi dall'altra parte del mondo". "I raggi cosmici non sono altro che nuclei di atomi ordinari privati dei loro elettroni – gli spiego, mentre la jeep percorre la

route 40, che verso sud porta in Patagonia – In gran parte sono nuclei d'idrogeno (ovvero protoni), ma possono anche essere nuclei di atomi più pesanti, addirittura di piombo.

Ordinaria materia, i raggi cosmici sono straordinari per moltissimi aspetti – proseguo nella mia spiegazione – Arrivano incessantemente sulla Terra, provenendo da tutte le direzioni. Viaggiano a velocità estrema, pari quasi a quella della luce. E le loro energie sono le più alte mai osservate per le particelle. Quelli più energetici raggiungono addirittura 10^{20} elettronvolt. Una tal energia, simile a quella di una palla di servizio di Francesca Schiavone, è ben 100 milioni di volte più grande dell'energia delle particelle prodotte nel più potente acceleratore del mondo, quello di Lhc del Cern di Ginevra!”.

“Se sono dei nuclei di atomo, allora saranno invisibili per i nostri occhi... Come avete fatto a scoprirli?”, mi chiede mio figlio.

“La scoperta dei raggi cosmici avvenne durante l'epico volo in mongolfiera del fisico tedesco Viktor Hess, nel 1912. Man mano che il pallone saliva, osservò con un elettroscopio, uno strumento che misura la quantità di carica elettrica, una radiazione sempre più intensa e concluse che la sua origine fosse nel cosmo. Avendo implicazioni sia per la fisica dell'estremamente piccolo (delle particelle elementari) sia dell'estremamente grande (del cosmo), la fisica dei raggi cosmici divenne presto un'attraente e fertile area di ricerca. E la sua storia è estremamente avventurosa! Dopo il volo di Hess, innumerevoli e via via più complessi rivelatori furono inviati sempre più in alto, prima su palloni e poi su satelliti in

orbita intorno alla Terra. Ma c'è un problema: i raggi cosmici diventano man mano più rari, quanto più alta è la loro energia. Ad esempio, il loro flusso intorno a un'energia di 10^9 eV è di circa uno al m^2 per secondo, ma diminuisce a uno al m^2 per anno all'energia di 10^{15} eV. Alle alte energie i ‘piccoli’ palloni o satelliti non bastano”.

“Interessante! E cosa vi siete inventati allora?”.

“Due fisici, uno francese, Pierre Auger, e uno italiano, Bruno Rossi, scoprirono, circa 30 anni dopo Hess, il fenomeno degli *sciame atmosferici*. I raggi cosmici, entrando nell'atmosfera terrestre, urtano subito i nuclei dei suoi gas. I frammenti della conseguente esplosione collidono con altri nuclei dell'atmosfera e così via, in uno straordinario processo a cascata che origina una moltitudine di particelle secondarie: lo sciame atmosferico. Più alta è l'energia primaria, più lo sciame di particelle è numeroso e ampio, e più penetra l'atmosfera. E così è incominciata l'avventura della ricerca sui raggi cosmici di alta energia, con ricercatori che costruiscono rivelatori di sciame nei più remoti angoli della Terra. L'area e l'altitudine degli strumenti sono scelte in base all'energia dei raggi cosmici sotto indagine”.

“Ed è questo che fate qui in Argentina?

Studiate gli sciame cosmici?”.

La jeep si è fermata. Lasciata la route 40, stiamo ora attraversando la pampa, e si cominciano a vedere i primi rivelatori, bianchi e sparpagliati. Un gaucho a cavallo sta radunando le vacche al pascolo, per permetterci di proseguire e attraversare il fiume. Sorride al nostro saluto e ci fa cenno con il sombrero.

b. /c.

A sinistra Piera Ghia con la jeep dell'Osservatorio di raggi cosmici Pierre Auger, a destra ricercatori al lavoro, mentre riparano uno dei rivelatori di Auger.





d.
Un gaucho a cavallo nei pressi
di uno dei rivelatori di Auger.

“Sì, qui studiamo i raggi cosmici di più alta energia, da 10^{18} eV in su. I loro sciami contengono miliardi di particelle che si distribuiscono su decine di km^2 . Abbiamo scelto questo luogo sperduto perché avevamo bisogno di un’area enorme (il flusso di raggi cosmici a queste energie è circa uno al km^2 all’anno), piatta, poco abitata e in montagna (qui siamo a 1400 metri). I rivelatori di particelle sono distribuiti su 3000 km^2 (che è circa l’area della Valle d’Aosta) a 1,5 chilometri l’uno dall’altro. Data la dimensione degli sciami, non è necessaria una grande densità di rivelatori. Avevamo anche bisogno di cieli limpidi e scarsa nuvolosità, perché abbiamo costruito 24 telescopi per osservare la luce ultravioletta emessa dagli sciami nell’atmosfera. È la natura stessa dei raggi cosmici che richiede siti e rivelatori estremi. E così, pensa che altri colleghi italiani hanno costruito un rivelatore di sciami, Argo, su un altopiano in Tibet, a 4300 metri (vd. fig. e). A una tale altezza, possono studiare gli sciami prodotti da raggi cosmici di più bassa energia (rispetto a quelli che misuriamo qui), ma sempre alta, circa uguale a quella delle

particelle prodotte al Cern. Gli sciami che osservano in Tibet sono molto più piccoli, qualche decina di m^2 di dimensione. Argo, perciò, è molto più piccolo ma molto più “denso”: in effetti, è un unico rivelatore di 7000 m^2 . Molto più delicato, è al riparo dentro un laboratorio appositamente costruito lassù in collaborazione con gli scienziati cinesi... Siamo arrivati: ora al lavoro!”. La giornata è lunga e faticosa. Dopo aver raggiunto un altro gruppo di tecnici e fisici, ci siamo divisi i compiti. Mio figlio ha fatto da aiutante nella delicata pulizia dei pannelli solari, necessari per alimentare l’elettronica dei rivelatori. Agli uccelli purtroppo piace fare il nido sui rivelatori e appollaiarsi sulle antenne che servono per la trasmissione dei dati per fare i loro bisogni! Io invece, con l’altro gruppo, ho percorso decine di chilometri nella pampa incendiata dal sole per visitare altri rivelatori in panne e sostituirne l’elettronica. In contatto solo via radio, ci siamo ritrovati tutti per un pranzo tardivo nel pomeriggio: i colleghi argentini hanno preparato una deliziosa e rinfocillante grigliata di carne in una delle rare radure ombreggiate.



e.
Il laboratorio Argo negli altipiani del Tibet.

Ora è sera e stiamo rientrando alla base. Verso ovest il cielo limpido è ancora incandescente del tramonto. Verso est iniziano ad accendersi le numerosissime stelle del cielo australe. Si vedono già i due batuffoli delle Nubi di Magellano. “Ma dove si producono i raggi cosmici? Nelle stelle?”. Nonostante l’estenuante giornata, mio figlio è ancora molto curioso!

“L’origine dei raggi cosmici, soprattutto quelli di più alta energia, è ancora misteriosa. Si pensa che siano prodotti nei fenomeni più violenti dell’universo. Anche nella nostra galassia, la Via Lattea, avvengono esplosioni stellari abbastanza potenti da poterli accelerare. Sono quelle che segnano la morte di alcune stelle. Note come supernovae, agiscono come un acceleratore cosmico: scagliano nello spazio particelle che sono accelerate dall’onda d’urto prodotta nelle esplosioni. Queste non hanno tuttavia la potenza necessaria per accelerare le particelle fino alle energie “alla Schiavone”. Si pensa allora che in

questi casi intervengano processi ancora più violenti, fuori dalla Via Lattea. Come, per esempio, quelli che avvengono nelle vicinanze di un buco nero, dove si creano campi magnetici enormi che possono accelerare particelle fino a energie estreme... Guarda! Una luce si muove nel cielo! È la Stazione Spaziale Internazionale: proprio stasera passa nel cielo di Malargue! Fin lì si spingono i fisici per studiare i raggi cosmici. Lassù c’è un rivelatore estremamente complesso, Ams. È un enorme magnete che può identificare con grande precisione la carica e la massa delle

frequenti particelle cosmiche primarie di più bassa energia, prima che urtino i nuclei atmosferici”.

“Insomma, mettendo insieme i dati di tutti gli straordinari esperimenti che hai nominato, quelli alla fine del mondo in Argentina, quelli sul tetto del mondo in Tibet e quelli che orbitano sopra l’atmosfera, voi fisici cercate di risolvere il problema dell’origine di questi straordinari raggi cosmici. Adesso ho capito che cosa ti spinge a venire fino a qui”, conclude un po’ esausto mio figlio, mentre entriamo nel parcheggio dell’albergo che ci ospita a Malargue.

Biografia

Piera Luisa Ghia è direttrice di ricerca al Laboratoire de Physique Nucléaire et de Hautes Energies (Lpnhe) del Centre National de la Recherche Scientifique (Cnrs) a Parigi. Ha lavorato per molti anni su esperimenti di fisica dei raggi cosmici ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso e dal 2000 partecipa all’esperimento Auger in Argentina, in cui presiede il comitato per la pubblicazione dei risultati dell’Osservatorio.

Dal cosmo agli abissi

La ricerca delle astroparticelle

di Elisa Resconi

a.

Immagine artistica di un lampo di raggio gamma in una regione di formazione stellare, cioè una porzione di galassia particolarmente ricca di stelle "giovani".

Tantissimi “acceleratori cosmici”, molto più potenti di Lhc a Ginevra, sono ospitati nell’universo. Possiamo immaginare che in ciascuno accada qualcosa di simile a quello che succede in Lhc, dove due fasci di protoni vengono accelerati ad altissime energie e fatti scontrare l’uno contro l’altro. Il risultato di tali scontri è una intensa emissione di particelle energetiche, fra cui particelle cariche, come i protoni e gli elettroni, e particelle neutre, come i fotoni e i neutrini: sono i raggi cosmici. Al contrario dell’acceleratore di Ginevra, però, non ci è dato sapere quasi nulla su questi “super super Lhc”: non conosciamo la loro posizione nell’universo, come funzionano, come si sono creati e come evolvono. Sappiamo solo che esistono, grazie all’osservazione dei raggi cosmici primari (per la maggior parte, protoni accelerati), la cui energia viene misurata da esperimenti come Auger e Argo (vd. p. 11). Oggi riteniamo che i “super super Lhc” possano essere i resti di esplosioni di supernovae, presenti anche nella nostra galassia. Oppure, le sorgenti dei misteriosi lampi di raggi gamma (in inglese, *gamma-ray-burst*), che costantemente “illuminano” il cielo con potentissime emissioni di fotoni di altissima energia (invisibili ai nostri occhi), che persistono in cielo solo per qualche secondo. Infine, possono essere galassie attive, nel cui cuore buchi neri milioni di volte più massicci del Sole forniscono energia all’acceleratore cosmico. Anche se di diversa “natura”, tutte queste sorgenti accelerano particelle cariche con le stesse “leggi fisiche” che sfruttiamo per far funzionare Lhc, anche se qui le particelle possono raggiungere energie milioni di volte più elevate che in Lhc.

Per rivelare la posizione e la natura di un acceleratore cosmico, i protoni, prodotti copiosamente e facili da rivelare a terra, non sono sufficienti. Essi infatti sono deflessi dai campi magnetici intergalattici: osservando a terra la loro direzione di arrivo non possiamo risalire alla posizione del nostro acceleratore. Dobbiamo quindi studiare altri prodotti degli “scontri”: elettroni, fotoni e neutrini. Ma gli elettroni sono sonde poco efficienti, perché perdono facilmente energia quando si trovano nell’acceleratore cosmico. Solo le particelle neutre, come i fotoni e i neutrini, sono in grado di viaggiare per lunghissime distanze e riuscire ancora a rivelarci la posizione e la natura degli acceleratori cosmici.

I fotoni sono di facile rivelazione. Per questo motivo, l’astrofisica si basa sullo studio di fotoni a varie lunghezze d’onda ed è dominata da missioni spaziali sempre più sofisticate, dedicate a questo scopo. Il ruolo dei fisici

italiani è di primaria importanza in questi esperimenti. Il primo satellite per la rivelazione dei fotoni di alta energia messo in orbita dall’Agenzia Spaziale Italiana (Asi) nel 1996 fu chiamato Beppo-Sax, in ricordo di Giuseppe “Beppo” Occhialini, uno dei padri della fisica astroparticellare in Italia. L’Asi collabora assiduamente con l’Infn nello studio dell’astrofisica delle alte energie. La missione Beppo-Sax portò contributi fondamentali allo studio dei lampi di raggi gamma, studiando la banda dei raggi X (fra i 10 e i 100 keV). Un altro satellite completamente italiano, ancora in funzione, è Agile (Astrorivelatore Gamma ad Immagini LEggero).

Agile produce immagini del cielo a energie più alte rispetto a quelle di Beppo-Sax. Grazie al contributo dell’Asi, dell’Infn, dell’Inaf (Istituto Nazionale di Astrofisica) e di molte università italiane, Agile ha prodotto le prime osservazioni di galassie attive durante periodi di forte variabilità. Agile è stato anche l’esperimento “pilota” che ha portato alla costruzione del satellite Fermi, costruito da una grande collaborazione internazionale che coinvolge l’Infn, che osserva con una risoluzione (spaziale ed energetica) mai ottenuta prima d’ora i fotoni X e gamma provenienti dalle sorgenti cosmiche. Lo studio dei fotoni nella banda dei raggi X e gamma ha rivelato diverse categorie di acceleratori cosmici presenti sia nella nostra galassia, sia al di fuori di essa. D’altro canto, lo studio isolato dei fotoni non permette in modo diretto di penetrare a distanza in un “super super Lhc” e studiare i suoi meccanismi più profondi, dato che i fotoni sono ostacolati dagli elettroni e dagli altri fotoni nella loro fuoriuscita dall’acceleratore. I candidati ideali da studiare sono dunque i neutrini di alta energia, i quali possono essere utilizzati per un’identificazione univoca e non ambigua degli acceleratori cosmici, visto che interagiscono molto raramente con la materia. Ma come facciamo a rivelarli, se sono così elusivi? Servirebbero rivelatori enormi, delle dimensioni dell’ordine del chilometro cubo: come se il centro di Siena fosse occupato tutto da grattacieli alti un chilometro! Solo rivelatori di queste grandezze riescono a “vedere” i neutrini di origine astrofisica. Gruppi di fisici di tutto il mondo si sono uniti per costruire osservatori estremi dedicati ai neutrini di alta energia. Gli italiani sono all’avanguardia con la realizzazione del più grande telescopio di neutrini, Km3net, grazie al coinvolgimento di sette università e sedi Infn, i Laboratori Nazionali di Frascati e, in particolar modo, i Laboratori Nazionali del Sud.



Ovviamente non può esistere nessun laboratorio in grado di ospitare un esperimento grande quanto il centro di Siena. Per questo motivo, i telescopi di neutrini basano il loro principio di funzionamento sull'uso di materiali naturali, come l'acqua del mare o il ghiaccio del Polo Sud. Quando un neutrino di alta energia interagisce con un nucleone (un protone o un neutrone) della materia, produce delle particelle cariche. Se queste sono sufficientemente energetiche, viaggiano a una velocità superiore a quella della luce nel mezzo stesso. Una luce blu, detta *radiazione (o luce) di Cherenkov*, viene emessa in corrispondenza del percorso delle particelle cariche. La luce di Cherenkov può essere osservata da rivelatori molto sensibili, chiamati *fotomoltiplicatori*. Un telescopio di neutrini è quindi costituito da un'antenna tridimensionale di fotomoltiplicatori, depositata in profondità in un materiale trasparente.

Il più grande telescopio di neutrini attualmente in funzione è installato al Polo Sud ed è chiamato semplicemente IceCube (dall'inglese "cubo di ghiaccio"). Più di 5000 fotomoltiplicatori sono stati depositati nel cuore del Polo Sud a una profondità fra i 1500 e i 2500 metri, allo scopo di utilizzare il ghiaccio più puro e pulito presente sulla Terra. IceCube è stato costruito grazie alla collaborazione di più di trecento scienziati distribuiti in tutto il mondo ed è stato completato nel 2010. Da allora i neutrini provenienti dall'atmosfera vengono registrati regolarmente. Due spettacolari neutrini di energia elevatissima, dell'ordine del milione di miliardi di elettronvolt, sono stati registrati da IceCube (vd. p. 19). Forse sono proprio questi i primi neutrini astrofisici prodotti da un "super super Lhc" che siamo riusciti a identificare. Ma è ancora presto per una risposta sicura, anche se l'interesse a riguardo è altissimo.

b.

La torre prototipo di Km3net Italia pronta per la messa in mare a bordo della nave Nautical Tide Fugro. La torre è stata immersa il 24 marzo scorso a 3500 metri di profondità 100 chilometri a largo di Capo Passero nel sud della Sicilia. È connessa a terra con un particolare cavo, che permette di alimentarla e ricevere, su fibra ottica, i dati registrati in fondo al mare. Km3net prevede di realizzare trenta strutture entro i prossimi tre anni e, successivamente, di completare il telescopio con ulteriori 90 strutture.

Biografia

Elisa Resconi è professoressa alla Technische Universität di Monaco di Baviera in Germania, dove fa parte della collaborazione di IceCube. Ha una specializzazione in fisica delle alte energie. Prima di trasferirsi in Germania nel 2000, ha studiato a Milano e poi a Genova, in collaborazione con i Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn.

Link sul web

<http://icecube.wisc.edu/news/view/105>
<http://www.km3net.org/>

[as]

Il giorno più lungo della mia vita.



Carlos Pobes è un ricercatore spagnolo esperto di fisica delle astroparticelle e, in particolare, di esperimenti sotterranei dedicati alle ricerche sui neutrini cosmici, prodotti in eventi estremi, e alla materia oscura. Nell'agosto 2011 Carlos è stato selezionato come membro della squadra incaricata della gestione di IceCube, al Polo Sud.

[as] Carlos, immagino che la selezione per trascorrere un anno al Polo Sud con la responsabilità di un esperimento delicato come IceCube sia stata molto dura...

Carlos [C]: La parte più difficile sono stati gli esami medici, che sono severissimi, perché in inverno il Polo Sud è isolato per otto mesi consecutivi e non c'è la possibilità di ricevere assistenza in caso di gravi problemi di salute.

Solo in seguito ai test clinici, ho affrontato i colloqui per la verifica delle mie competenze professionali e, soprattutto, della mia attitudine ad affrontare i problemi e a relazionarmi con gli altri. L'aspetto sociologico è molto importante. Infine, all'Università del Madison, negli Usa, sono stato addestrato al funzionamento del rivelatore e al soccorso d'emergenza e antincendio. Solo dopo tutta questa lunga trafila sono volato al Polo Sud.

[as] Che si trova su un altopiano ghiacciato e ventoso, a più di 2800 metri sul livello del mare... Come ci si abitua a vivere tanto tempo in queste condizioni?

[C]: È difficile adattarsi all'altitudine e alla secchezza, più che al freddo stesso. Poi c'è il problema del sonno. Durante l'inverno australe, in particolare, con la mancanza del Sole, è difficile addormentarsi con orari regolari e il ciclo del sonno è completamente stravolto. Le prime settimane inoltre si subisce molta pressione nel sapere che il più grande telescopio per neutrini del mondo è sotto la propria responsabilità. Inoltre, il rivelatore e la stazione principale sono dotati di un gran numero di sistemi d'allarme, ai quali è necessario prestare costantemente attenzione.

[as] Di che cosa ti occupavi esattamente?

[C]: Il compito principale della mia squadra era garantire che il rivelatore funzionasse senza interruzioni. Ci sono moltissimi strumenti che lo controllano e non è improbabile che qualcosa non vada proprio come dovrebbe. La maggior parte delle volte si tratta di piccole cose, ma può anche accadere che uno dei sistemi principali del rivelatore si blocchi del tutto, e non deve succedere. Ci sono fenomeni astrofisici, come le esplosioni di supernova, che si verificano una volta ogni trent'anni e possono durare solo pochi secondi. Sarebbe un peccato se il rivelatore fosse "spento" proprio in quel momento! Uno dei problemi più gravi è avvenuto proprio il giorno prima che "Ernie" colpisse il rivelatore, ma fortunatamente l'abbiamo risolto in poco tempo.

[as] Chi è Ernie?

[C]: Ernie è il suo soprannome. Si tratta del neutrino di più alta energia mai osservato prima, e non soltanto da IceCube, ma da qualsiasi rivelatore di neutrini esistente al mondo. Il 3 gennaio 2012, per una frazione di

secondo, quasi tutti i sensori di IceCube hanno registrato un segnale luminoso prodotto dal passaggio di questa particella. Se il problema al rivelatore fosse insorto il 3 gennaio o avessimo avuto bisogno di più tempo per risolverlo, l'avremmo perso. Un segnale simile era stato registrato solo l'8 agosto 2011 e, vista l'eccezionalità della coppia, abbiamo deciso di dare a questi due neutrini i nomi di Bert ed Ernie, i pupazzi del Muppet Show molto popolari negli Stati Uniti.

[as] Immagino che nel tempo libero non fosse facile uscire a fare una passeggiata...

[C]: Qualche volta sono andato a correre all'aperto, ma solo con temperature al di sopra di -60 °C. A -76 °C, la minima registrata durante l'inverno, abbiamo voluto provare l'emozione di una notte in tenda. È una delle tante tradizioni che animano il Polo Sud! Comunque, non è raro uscire per fare una passeggiata di un'ora o due, per scattare fotografie, e ci si adatta anche quando le temperature sono al minimo. La stazione, poi, offre molte possibilità per fare sport e trascorrere il tempo libero. Io ho utilizzato buona parte del tempo disponibile per tenermi in contatto con il mondo attraverso la pagina Facebook "El dia mas largo de mi vida" e il blog (www.eldiamaslargodemivida.com) che ho aperto per raccontarmi. È stato davvero bello avere il sostegno di tante persone.

[as] Dopo un anno, al tuo rientro, hai sofferto il ritorno alla normalità?

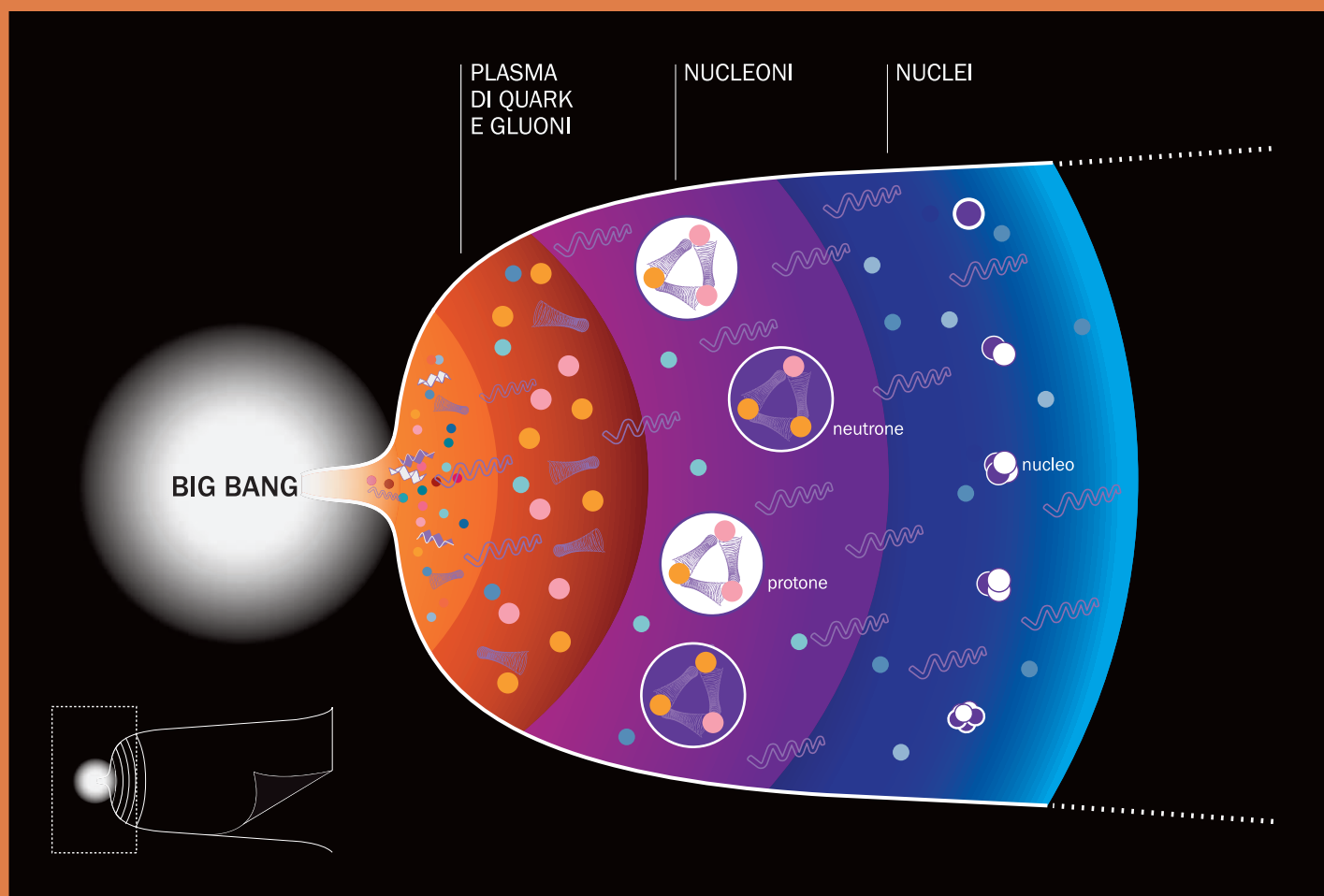
[C]: Ho fatto una tappa intermedia in Nuova Zelanda e comunque sì, il rientro è stato strano. Tutto pareva così familiare e normale che a volte avevo la sensazione si fosse trattato solo di un sogno. Poi ho iniziato a tenere delle conferenze per raccontare quella straordinaria esperienza e sono riuscito in qualche modo a convincermi che era tutto vero. In realtà, una volta che ci si abitua a quella vita è davvero facile e adesso capita di sentirne la mancanza. [Francesca Scianitti]

Brodo primordiale

Uno stato estremo della materia

di Pasquale Di Nezza

a.
I primi minuti dell'evoluzione dell'universo (vd. anche fig. c p. 7, ndr). La transizione da plasma di quark e gluoni a nucleoni avviene ca. un decimillesimo di secondo dopo il Big Bang. I primi nuclei leggeri si formano alcuni secondi dopo.



Due miliardi di gradi! È questa la straordinaria temperatura che l'acceleratore Lhc riproduce in laboratorio per studiare l'universo primordiale, così come si presentava circa un decimillesimo di secondo dopo il Big Bang.

A quel tempo l'universo si è trovato in una fase di transizione, in cui i quark, i mattoni della materia, e i gluoni, i mediatori della forza forte, erano liberi di muoversi in uno stato di materia che chiamiamo *plasma di quark e gluoni* (QGP, Quark Gluon Plasma). Successivamente, l'espansione dell'universo

e il suo conseguente raffreddamento portarono i quark e i gluoni ad avere un'energia non più in grado di contrastare l'interazione forte e quindi a legarsi secondo le leggi della cromodinamica quantistica (QCD, Quantum ChromoDynamics, vd. Asimmetrie n. 14 p. 25), rimanendo confinati nei nucleoni di cui oggi è formata la materia. Studiare questa particolare fase di crescita dell'universo ci fa quindi capire come sono nate le particelle della materia, la loro evoluzione e interazione.

Tutte le ipotesi introdotte dai modelli standard cosmologico e delle particelle elementari necessitano di una verifica sperimentale.

Bisogna così ricreare in laboratorio le stesse condizioni energetiche presenti nell'universo primordiale esistito circa quattordici miliardi di anni fa, contenere e studiare un volume di materia finito e per un lasso di tempo sufficiente. Il sistema che studiamo in laboratorio ha le dimensioni di alcune decine di nanometri, ma è comunque sufficiente per la nostra investigazione.

Due miliardi di gradi equivalgono a creare uno stato della materia centomila volte più caldo del nucleo del Sole. Un'impresa realizzabile in Lhc dove per scoprire il bosone di Higgs si sono fatti scontrare protoni contro protoni ad altissima energia. Tali collisioni, però, producono una moltitudine di singole particelle. Per ottenere in laboratorio un volume finito di plasma occorre invece far collidere oggetti molto più estesi e pesanti dei protoni e ciò viene effettuato iniettando in Lhc ioni di piombo al posto dei protoni.

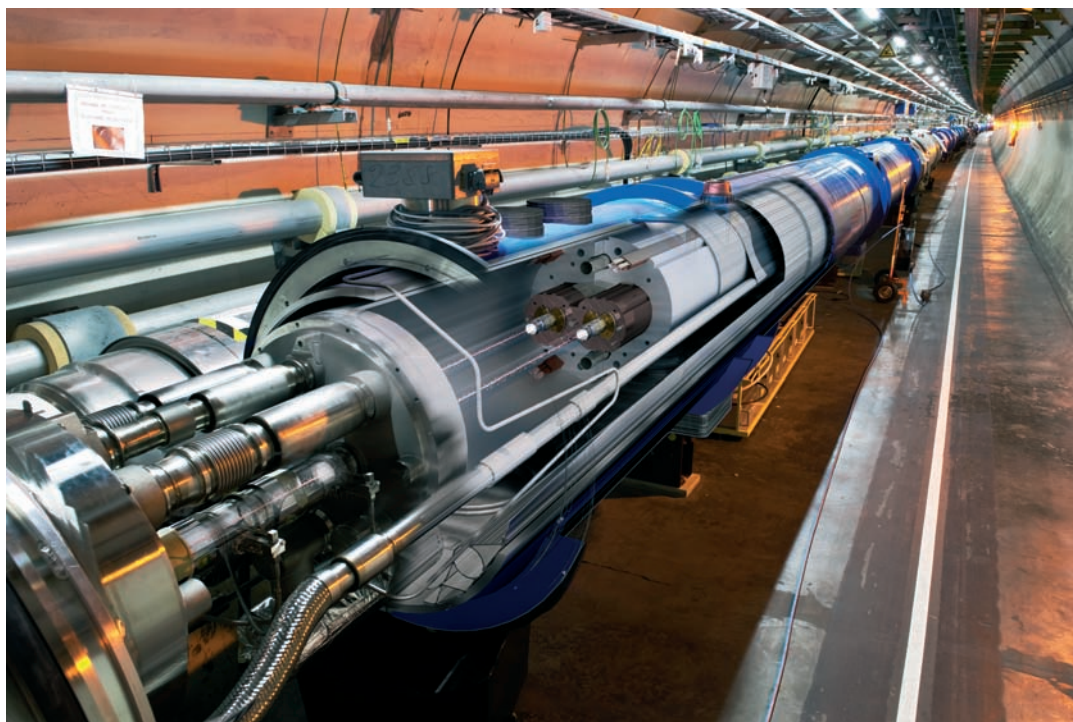
L'accelerazione cui sono sottoposti gli ioni è dirompente e l'enorme velocità alla quale viaggiano fa sì che compiano i 27 chilometri dell'intera lunghezza dell'acceleratore circa 11.000 volte ogni secondo! I pacchetti di ioni, viaggiando in direzioni opposte nei due tubi dove è stato prodotto un *ultra-vuoto* (più vuoto

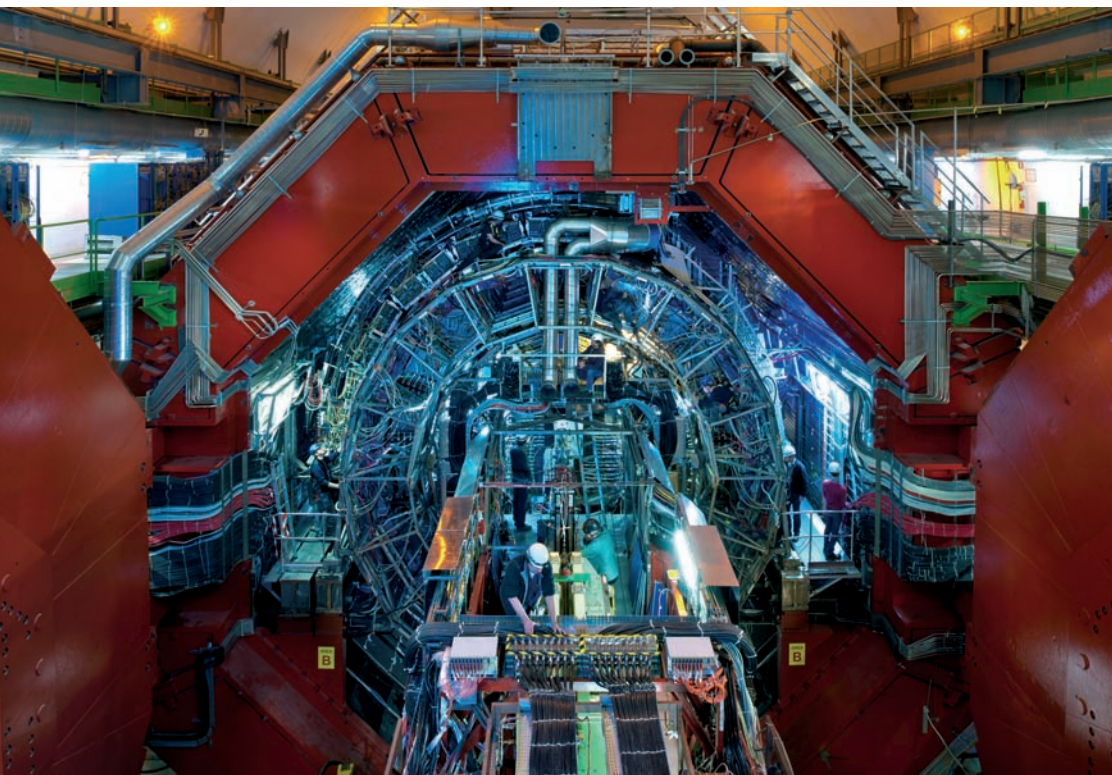
dello spazio al di fuori del sistema solare), danno luogo a centinaia di milioni di collisioni al secondo. Una moltitudine di dati da analizzare che permette di accedere anche agli effetti più rari e finora mai studiati.

Gli ioni viaggiano quasi alla velocità della luce e il loro fascio ha un'energia confrontabile con quella di un treno di 400 tonnellate che viaggia alla velocità di 150 km/h. Per mantenere tali particelle sulla traiettoria dell'acceleratore, la tecnologia classica dei magneti dipolari non è sufficiente. Le ultime tecnologie nel campo della superconduttività ci permettono di superare il problema, riconfermando Lhc come la macchina alla frontiera della conoscenza fisica, ingegneristica e informatica. Ecco allora il motivo per la realizzazione di oltre 1200 magneti superconduttori che operano alla temperatura di 1,9 K (circa -271 °C). Se consideriamo che la temperatura media dell'universo, dovuta alla radiazione cosmica di fondo, residuo energetico del Big Bang, è di 2,7 K, ci troviamo ad avere contemporaneamente nello stesso posto, in Lhc, la temperatura più bassa (circa due kelvin) e quella più alta (circa due miliardi di kelvin) dell'universo!

Ma come si fa a "vedere" il plasma di quark e gluoni e come si investiga l'universo primordiale? Uno dei quattro maggiori

b. Ricostruzione virtuale dell'interno dell'acceleratore Lhc. Sono visibili il complesso sistema di criogenia, che mantiene i magneti superconduttori a circa 2 kelvin, e i due fasci di particelle che viaggiano sulle due traiettorie di 27 chilometri.





c.

Il rivelatore Alice, con un volume di più di 6000 metri cubi e un peso di oltre 10.000 tonnellate, con le porte del magnete aperte.

esperimenti di Lhc, Alice (A Large Ion Collider Experiment), è stato appositamente progettato e realizzato per effettuare questo tipo di misure. A ogni interazione degli ioni di piombo, si formano migliaia di particelle che faticano ad attraversare il mezzo denso e caldo del plasma di quark e gluoni, perdendo molta della loro energia iniziale. È quindi importante essere in grado di rivelare e riconoscere tutte le particelle, in particolare quelle di bassa energia. Inoltre bisogna poter distinguere le particelle contenenti quark pesanti (charm o bottom), che attraversano il plasma in modo diverso, da quelle composte da quark leggeri (up o down). O ancora rivelare i muoni che ci dicono come, ad esempio, si sono prodotte le particelle J/Ψ , un particolare stato legato di un quark charm e un antiquark charm.

I 1100 fisici che compongono la collaborazione internazionale Alice, tra cui un centinaio di italiani (la più alta percentuale italiana tra gli esperimenti in Lhc), hanno già compreso tante delle caratteristiche del plasma di quark e gluoni. Innanzitutto, più che come un plasma, il nostro universo primordiale si comporta come un liquido! Un liquido perfetto, con bassissima viscosità e con un'altissima densità di energia, pari a 16 GeV per femtometro cubo (un femtometro è un

milionesimo di miliardesimo di metro), come se l'energia irradiata dal Sole in un giorno venisse concentrata nello spazio di una biglia. Nonostante molte delle caratteristiche del plasma di quark e gluoni siano state misurate e capite, il cammino per comprendere l'universo primordiale è appena incominciato e il traguardo è ancora lontano. In particolare, la cromodinamica quantistica, che mira a spiegare l'interazione dei mattoni della materia (i quark) e a capire il processo di formazione delle particelle complesse, non riesce ancora a spiegare molti degli aspetti del plasma di quark e gluoni. È questa una delle sfide della fisica attuale, che Lhc si appresta a portare a compimento nell'incessante corsa alla comprensione della natura.

Biografia

Pasquale Di Nezza è ricercatore presso i Laboratori Nazionali di Frascati, dove è capogruppo dell'esperimento Alice e si occupa della fisica sperimentale del plasma di quark e gluoni. Prima di svolgere attività di ricerca al Cern di Ginevra, ha lavorato al Deutsches Elektronen-Synchrotron (Desy) di Amburgo.

Link sul web

home.web.cern.ch

www.cern.ch/alice

www.youtube.com/cern

Il fascino dell'impossibile

Eventi rari e fisica oltre il modello standard

di Barbara Sciascia

a.
Una parte del rivelatore di muoni
dell'esperimento Lhcb durante
l'installazione.

Alice rise: “È inutile che ci provi – disse – non si può credere a una cosa impossibile”. “Oserei dire che non ti sei allenata molto – ribatté la Regina – Quando ero giovane, mi esercitavo sempre mezz’ora al giorno. A volte riuscivo a credere anche a sei cose impossibili prima di colazione”.

A differenza di Alice nel paese delle meraviglie, i fisici si allenano molto e arrivano a credere a ben più di sei “cose impossibili”, anche se non si tratta tanto di credere, quanto di misurare fenomeni impossibili o molto rari. Non sappiamo perché la Regina volesse esercitarsi sulle cose impossibili, ma sappiamo molto bene perché lo facciamo noi fisici. Il modello standard delle particelle elementari, pur descrivendo con grande accuratezza quasi tutti i risultati sperimentali finora ottenuti, non include la forza di gravità, non dà nessuna spiegazione sulla materia oscura (sei volte più abbondante della materia ordinaria), né spiega perché esistono tre famiglie di particelle che si differenziano essenzialmente per una diversa massa. Siamo convinti che il modello standard è solo una parte di una teoria più ampia, cercata senza successo da molti anni; e anche se sono state avanzate molte proposte, nessuna finora ha avuto conferme sperimentali. Quelle più promettenti sono le teorie che includono la *supersimmetria*, la proprietà secondo cui a ogni particella fondamentale del modello standard corrisponde una compagna, detta *superparticella*. Lo studio di fenomeni molto rari o addirittura impossibili, dà indicazioni importanti su quale delle *teorie Susy* (dall'inglese *SUPERSymmetry*), potrebbe diventare il nuovo modello standard. Le superparticelle, se esistono,



Hic sunt leones

1.
Lo studio attento della cartina indica dove è più probabile trovare un buon sentiero, ma sarà poi il percorrere realmente la montagna che confermerà la scelta fatta.



Hic sunt leones era la scritta che nelle antiche carte geografiche indicava all'incauto esploratore il possibile pericolo nascosto nelle zone ancora inesplorate, e come tali piene forse di nuove ricchezze e conoscenze. Tanto da spingere molti a rischiare l'incontro con i *leones*. Anche i fisici sono mossi da una brama di conoscenza analoga, quando esplorano le zone sconosciute delle loro teorie.

In fisica, tra teoria ed esperimento, c'è più o meno lo stesso rapporto che c'è tra una carta topografica e il terreno che essa descrive. Se un esploratore (il fisico sperimentale) scopre qualcosa di nuovo sul campo, la cartina deve essere modificata. Il compito del cartografo (il fisico teorico) è quello di organizzare i dati raccolti sul terreno dagli esploratori, disegnando cartine sempre più precise. In ogni caso, se cartina e terreno sono in disaccordo, sarà sempre la prima a dover essere modificata!

Nella fisica delle particelle elementari abbiamo un'ottima cartina, nota come modello standard, ma vorremmo ampliarla per includere regioni sconosciute non

ancora descritte, dove campeggia l'*hic sunt leones*. A differenza di una vera cartina, le aggiunte devono rispettare regole rigorose (principi di simmetria, leggi di conservazione) e il modo migliore per capire come farle, è andare in esplorazione (fare nuove misure).

L'analoga tra geografia e fisica non può essere spinta troppo oltre, ma può aiutarci ancora un po'. Il passaggio verso terre sconosciute, oltre una catena di montagne apparentemente invalicabile, dovrà essere cercato in luoghi impervi prima inesplorati (ricerca di "eventi impossibili" o quasi). Ma utili indicazioni di quale dei tanti luoghi impervi esplorare, potrebbero venire da un'attenta analisi della cartina, cioè di quello che già si conosce. Un'altra indicazione di terre sconosciute potrebbe essere la presenza di piante non autoctone. E i posti migliori in cui possono crescere floride sono le zone con moltissimi altri alberi: il problema in questo caso è quello di distinguere l'albero della specie nuova da tutti gli altri, spesso molto simili (lo studio degli "eventi rari").

possono essere scoperte e studiate in due modi diversi e complementari: producendole in acceleratori di particelle come Lhc (ricerca *diretta*) o studiandone gli effetti su altri tipi di fenomeni (ricerca *indiretta*). Fino a oggi la ricerca diretta in Lhc da parte degli esperimenti Atlas e Cms non ha rivelato nessuna superparticella e bisognerà attendere i dati a più alta energia, che saranno raccolti a partire dal 2015. Nella ricerca indiretta, fenomeni molto promettenti sono il decadimento del mesone B_s in due muoni e il decadimento del muone in un elettrone e un fotone. Vediamo di che cosa si tratta.

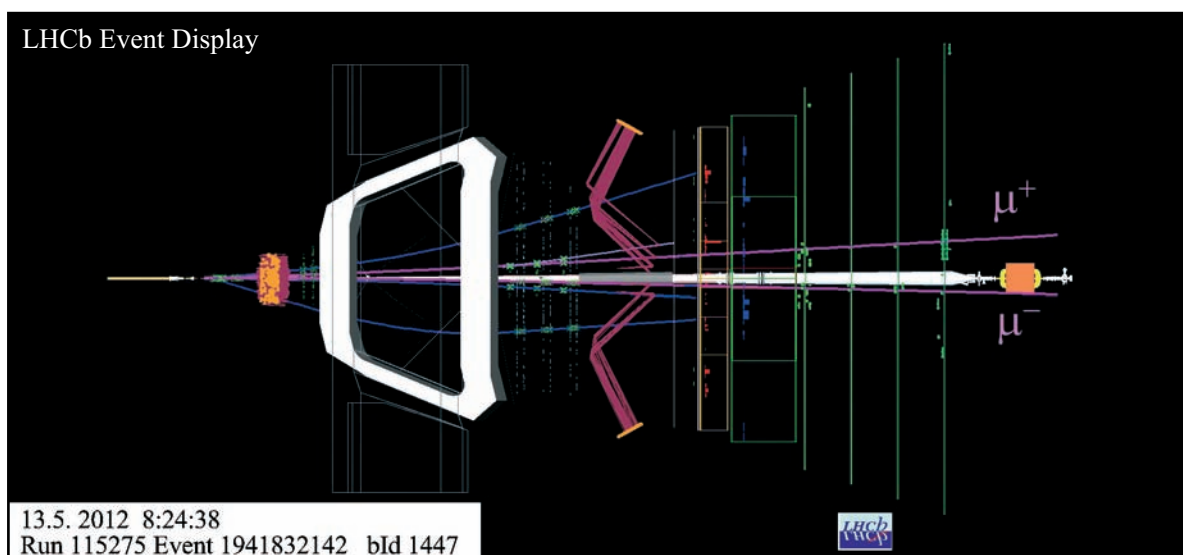
Quasi tutte le particelle di materia del modello standard, una volta create, vivono per pochissimo tempo (di solito frazioni minime di secondo) prima di morire, i fisici dicono “prima di *decadere*”, trasformandosi in altre particelle. Ciascuna particella può decadere in diverse combinazioni di altre particelle e la probabilità con cui si manifesta una combinazione o l'altra può essere calcolata teoricamente.

Secondo il modello standard, la probabilità che un mesone B_s (composto da un antiquark bottom e un quark strange) decada in due muoni è molto piccola, appena tre volte ogni miliardo di decadimenti. L'esistenza di particelle supersimmetriche può modificare questa probabilità, aumentandola o diminuendola.

La ricerca di un B_s che decada in due muoni è iniziata più di 25 anni fa. Gli ultimi in ordine di tempo a provare a trovarlo sono stati tre degli esperimenti attivi in Lhc: Atlas, Cms e Lhcb. Finalmente, nel novembre 2012, analizzando un campione di dati contenente più di cinquanta miliardi di mesoni B_s , Lhcb ha individuato una manciata di eventi (uno è mostrato in fig. b), in cui il mesone B_s decade in due muoni. È uno dei decadimenti più rari mai osservati in natura.

L'impresa sperimentale è stata enorme. I pacchetti di protoni in Lhc collidono una volta ogni cinquanta miliardesimi di secondo, producendo ogni secondo quasi quattordici milioni di eventi registrati dal rivelatore Lhcb. Di tutti questi eventi, solo poche migliaia ogni secondo sono interessanti da studiare, e una delle sfide dei moderni rivelatori è proprio quella di individuare i pochissimi eventi “buoni” in tempi brevi (nel caso di Lhcb qualche millesimo di secondo al massimo). Questo compito è svolto dal *trigger* (dall'inglese “attivare”) uno dei sistemi fondamentali di ogni esperimento. Nel trigger, proprietà dei rivelatori e caratteristiche dei decadimenti da selezionare si fondono in un unico sistema, capace di riconoscere gli eventi senza studiarli in dettaglio. Senza un ottimo trigger gli esperimenti di Lhc registrerebbero quasi solo eventi poco significativi, e sicuramente Atlas e Cms non avrebbero potuto scoprire il bosone di Higgs!

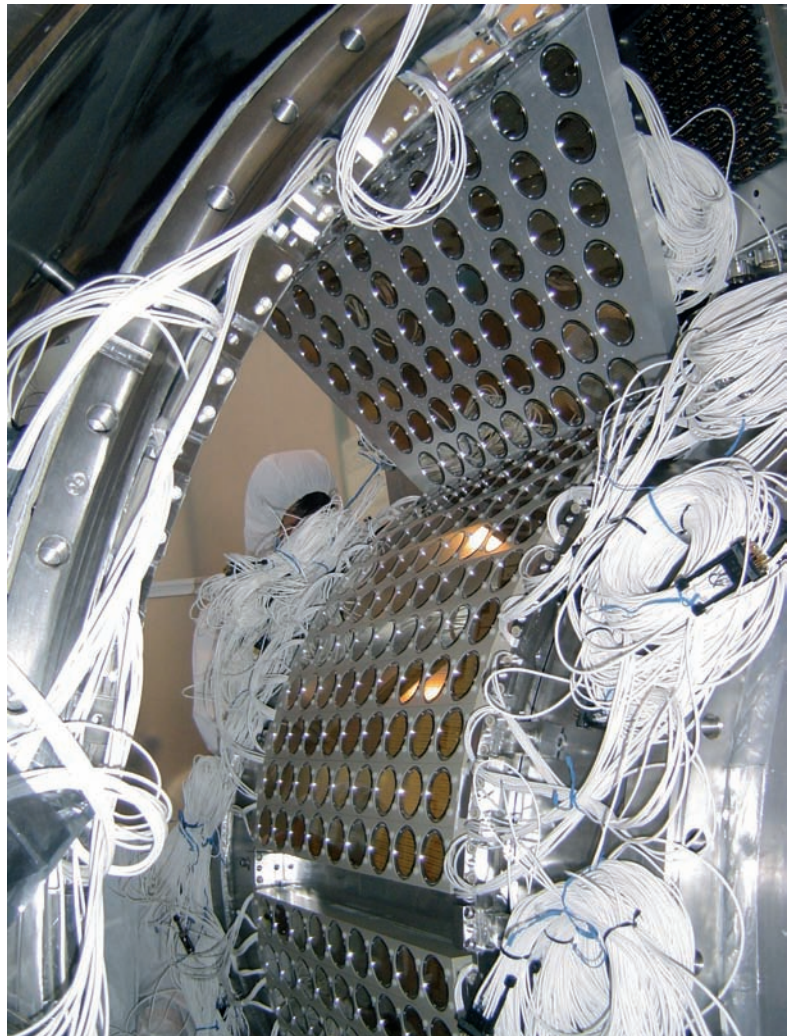
b.
Rappresentazione schematica di uno degli eventi del campione di dati raccolto da Lhcb nel 2012, in cui un mesone B_s è probabilmente decaduto in due muoni: le due lunghe linee viola rappresentano i due muoni che provengono da un unico punto (a sinistra), dove il mesone B_s è decaduto a pochi millimetri di distanza da dove è stato prodotto nell'interazione dei fasci di protoni di Lhc.



Tornando a Lhcb, nel caso della ricerca del B_s , il “segnale” da cercare è semplice: due muoni che provengono da uno stesso punto, quello dove il B_s è decaduto. Un primo problema è che in ciascun evento possono esserci decine di muoni prodotti dal decadimento di altre particelle, e non è semplice trovare “quelli giusti”. Ma la ricerca di un decadimento raro come il B_s in due muoni va ben oltre la scelta dei due muoni, e richiede l’impiego di tecniche avanzate di analisi dati, per alcuni aspetti simili alle tecniche di riconoscimento facciale che vediamo all’opera in molti telefilm investigativi. Con la manciata di eventi selezionati, Lhcb ha misurato la probabilità che il B_s decada in due muoni, trovando un valore molto simile a quello previsto; un valore non in accordo con la teoria sarebbe stato un chiaro segnale di fisica oltre il modello standard, cercata da molti anni. Successivamente anche l’esperimento Cms ha completato un’analisi di eventi di decadimento di un B_s in due muoni e lo scorso luglio i due esperimenti hanno presentato una misura combinata dei loro risultati. Sempre secondo il modello standard è di fatto impossibile che un muone decada in un elettrone e un fotone. La probabilità che ciò accada è così piccola che per sperare di osservarlo dovremmo studiare un numero enorme di muoni (più di quanti possano essere mai prodotti dall’uomo!). Invece, in molte teorie Susy, la probabilità che ciò avvenga assume valori un po’ più alti, sempre piccoli, ma tali da poter essere misurati sperimentalmente, anche se ciò non è ancora successo. Lo scorso aprile, l’esperimento Meg presso il Paul Scherrer Institut di Zurigo ha terminato l’analisi dei dati raccolti e, non avendo trovato nessun muone decaduto in un

elettrone e un fotone, ha determinato che, se anche ciò accadesse, non potrebbe farlo più di due volte ogni mille miliardi di muoni osservati. Questo è oggi il limite più stringente che abbiamo, ma in futuro la ricerca potrebbe proseguire con l’esperimento Mu2e presso il Fermilab di Chicago, negli Stati Uniti, che analizzerà i diecimila miliardi di miliardi di muoni che saranno prodotti nei primi due anni di presa dati. Potrebbe non essere lontano il tempo in cui capiremo perché molte particelle hanno smesso di esistere pochi istanti dopo il Big Bang, perché l’universo è fatto di materia e non di antimateria e qual è l’essenza della materia oscura. E allora capiremo che avremo fatto bene a seguire, come la Regina, il fascino dell’impossibile, sia esso lo studio accurato del decadimento del B_s in due muoni o la ricerca del muone che decade in elettrone e fotone.

c.
Una fase del cablaggio del rivelatore di fotoni dell’esperimento Meg del Paul Scherrer Institut di Zurigo.



Biografia

Barbara Sciascia è ricercatrice presso i Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf) dell’Infn. Collabora agli esperimenti Kloe ai Lnf e Lhcb al Cern. In Lhcb fa parte del gruppo di lavoro che studia il decadimento del mesone B_s in due muoni.

Link sul web

<http://lhcb-public.web.cern.ch/lhcb-public/>

<http://meg.web.psi.ch/>

<http://mu2e.fnal.gov/public/gen/>

<http://cms.web.cern.ch/news/very-rare-decay-has-been-seen-cms>

Assenti giustificati

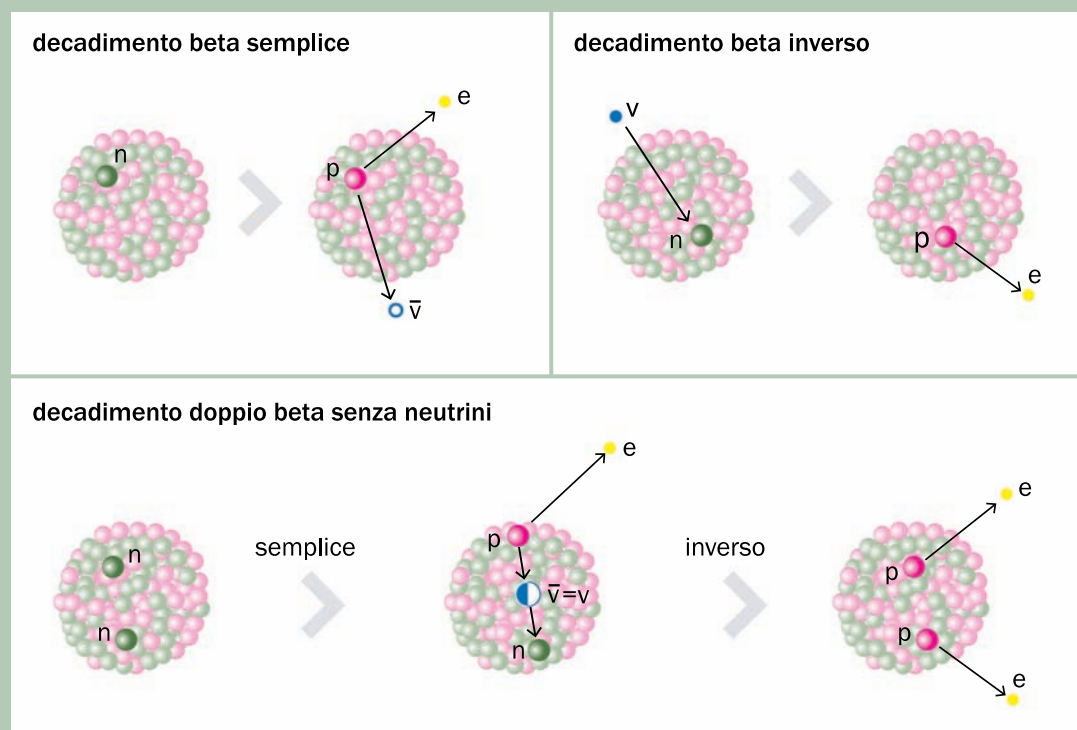
Sulle tracce del neutrino di Majorana

di Fabio Bellini

Ogni secondo il nostro corpo è attraversato da decine di migliaia di miliardi di neutrini, le particelle più elusive che conosciamo. Sono passati più di 50 anni dalla loro scoperta, ma le loro proprietà fondamentali sono ancora ignote. Gli intensi sforzi sperimentali dell'ultimo decennio hanno evidenziato che hanno massa, ma anche che essa è estremamente piccola: almeno 500.000 volte più piccola di quella dell'elettrone. Ad affascinare gli scienziati non è solo il valore della massa, ma anche la sua natura intima che potrebbe essere diversa da quella di tutte le altre particelle note. Infatti, i neutrini appartengono alla classe di particelle chiamate *fermioni*, i quali, in accordo con la teoria di Dirac che li descrive, hanno un partner distinto, chiamato *antifermione*, con la stessa massa ma con carica opposta. Il neutrino è l'unico fermione elementare a essere privo di carica e per questo potrebbe essere l'antiparticella di se stesso. Il modo

più promettente per verificare questa suggestiva ipotesi, formulata da Majorana negli anni '30, consiste nella ricerca di un processo estremamente raro: il *doppio decadimento beta senza (anti-)neutrini*.

Un *decadimento beta* semplice consiste nella trasformazione di un neutrone in un protone, con l'emissione di un elettrone e di un antineutrino (vd. fig. a). È possibile anche il processo inverso, in cui un neutrino collide con un neutrone producendo un protone e un elettrone. Se il neutrino è una particella di Majorana, cioè coincide con l'antineutrino, l'antineutrino prodotto nel primo decadimento beta potrebbe a sua volta interagire (nei panni di un neutrino) con un neutrone ed emettere un altro protone e un secondo elettrone (vd. fig. a, in basso). È questo il doppio decadimento beta senza neutrini: due neutroni si trasformano in due protoni e due elettroni, senza che vi siano neutrini nello stato finale.



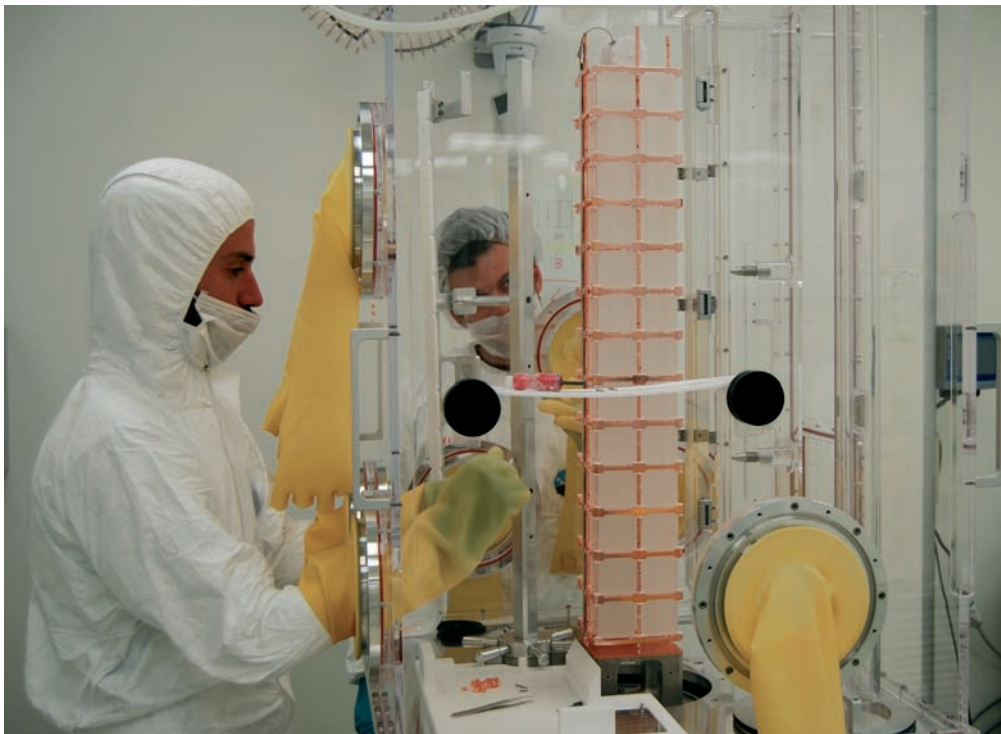
a.
Tre possibili processi beta. In alto a sinistra, semplice: un neutrone all'interno di un nucleo decade in un protone (che resta nel nucleo), un elettrone e un antineutrino; in alto a destra, inverso: un neutrino interagisce con un neutrone producendo un protone e un elettrone; in basso, doppio senza neutrini: se il neutrino e l'antineutrino coincidono, l'antineutrino del processo semplice è anche il neutrino che innesca il processo inverso. Nel nucleo restano due protoni e vengono prodotti due elettroni senza neutrini.

Questo processo è permesso solo nella teoria di Majorana e la probabilità che ciò accada è proporzionale a due diverse quantità: alla probabilità di avere due decadimenti beta simultanei e al quadrato della massa del neutrino. Il secondo aspetto implica anche che l'osservazione di questo processo fornirebbe allo stesso tempo una misura della massa del neutrino. Insomma la scoperta del decadimento doppio beta senza neutrini è una delle sfide più importanti della fisica delle particelle, visto che aprirebbe definitivamente le porte a nuova fisica oltre il modello standard, confermando in un colpo solo la correttezza dell'ipotesi di Majorana, e quindi la natura speciale dei neutrini, e misurandone anche la massa. La vera difficoltà è che la probabilità che ciò si verifichi è piccolissima, così piccola che ci aspettiamo di vedere meno di un evento ogni dieci milioni di miliardi di miliardi di anni, mentre l'universo in cui viviamo ha poco più di tredici miliardi di anni! Sembrerebbe una misura senza alcuna possibilità di riuscita, ma non è così. Affinché il doppio decadimento beta senza neutrini possa avvenire è necessario che i due neutroni siano molto vicini, come lo sono all'interno del nucleo atomico. I nuclei in cui è più probabile che avvenga il decadimento doppio beta senza neutrini sono quelli con un egual numero di protoni e di neutroni: in particolare, si usano isotopi del tellurio, del germanio, dello xenon, del molibdeno e del selenio. Il tellurio (Te) è l'elemento più usato, perché quello che si trova in natura contiene più del 30% dell'isotopo ^{130}Te utile alla misura, a differenza degli altri che contengono solo piccole percentuali dell'isotopo necessario. A questo punto l'osservazione sperimentale del doppio decadimento beta senza neutrini è apparentemente semplice: il decadimento dei due neutroni all'interno del nucleo padre (per esempio, il tellurio) produce

due protoni che rimangono nel nucleo figlio (lo xenon, nel caso del tellurio) e l'emissione di due elettroni. Non essendoci altre particelle prodotte sappiamo che la somma delle energie degli elettroni deve essere uguale alla differenza tra la massa del nucleo padre e del nucleo figlio. Per evitare di aspettare più dell'età dell'universo, è necessario osservare molti nuclei insieme: per esempio 100 kg di tellurio corrispondono a quasi un miliardo di miliardi di miliardi di atomi. Con un così alto numero di atomi nel tempo di vita tipico di un esperimento (tra i cinque e i dieci anni) si dovrebbero osservare una decina di eventi. Sì, solo una decina... non pochi per un evento quasi impossibile! Per riconoscere questi pochi eventi basterà misurare l'energia dei due elettroni emessi e controllare che la somma sia quella giusta.

La realtà è però assai più complicata a causa del problema del fondo. Questo consiste di tutti quegli eventi che, pur essendo di natura completamente diversa, danno luogo a un segnale indistinguibile da quello degli elettroni emessi nel doppio decadimento beta senza neutrini: due elettroni con la somma giusta di energia. Tale segnale può essere causato da decadimenti radioattivi di materiali vicini ai rivelatori oppure dalle interazioni di particelle provenienti dall'ambiente in cui il rivelatore si trova a operare. Se all'energia a cui ci si aspetta il segnale vi sono molti altri "segnali" dovuti al fondo, osservare i pochi eventi di segnale sarebbe come cercare di captare le note di un violino all'interno di uno stadio di calcio al momento del gol.

Il mistero che si cela nella massa del neutrino affascina i fisici di tutto il mondo da tempo. Sono stati ideati rivelatori all'estremo limite della tecnologia conosciuta, per riuscire a trovare un evento così raro come il doppio decadimento beta



b.
Ricercatori all'opera mentre assemblano alcuni dei bolometri dell'esperimento Cuore nei Laboratori del Gran Sasso (vd. approfondimento).

Dritti al Cuore

Cuore, in costruzione nei Laboratori del Gran Sasso dell'Infn, è un esperimento ideato per studiare il decadimento doppio beta senza neutrini. Il rivelatore è costituito da circa mille cristalli di diossido di tellurio (equivalenti a circa 200 kg dell'isotopo ^{130}Te), ciascuno funzionante come un *bolometro*. Con questo nome si indica uno strumento capace di misurare l'innalzamento di temperatura prodotto dal passaggio al suo interno di una particella carica, per esempio un elettrone. La variazione di temperatura è determinata dalla capacità termica del bolometro stesso: più quest'ultima è piccola, più la variazione di temperatura provocata dal passaggio dell'elettrone sarà grande e quindi facile da misurare. A basse

1.
L'Infn ha contribuito al recupero di una nave romana naufragata 2000 anni fa che trasportava piombo. Nella figura uno dei circa 300 lingotti recuperati e poi fusi per costruire lo schermo dell'esperimento Cuore ai Laboratori del Gran Sasso.



temperature, la capacità termica diminuisce come il cubo della temperatura stessa: i cristalli di Cuore sono dunque tenuti a una temperatura molto bassa, 10 millesimi di kelvin, condizione necessaria per misurare le piccolissime variazioni di temperatura indotte dal passaggio degli elettroni emessi nel doppio decadimento beta senza neutrini.

I Laboratori del Gran Sasso si trovano in grandi sale scavate accanto a una delle gallerie autostradali che attraversano la montagna del Gran Sasso, in Abruzzo. La roccia della montagna, con uno spessore equivalente a circa 3500 m di acqua, assorbe le particelle di origine cosmica e riduce drasticamente il contributo al fondo dovuto all'ambiente esterno. Luogo ideale per la ricerca di eventi rari, ma non

ancora sufficiente per la misura del decadimento doppio beta senza neutrini. Infatti, le medesime rocce che proteggono dal fondo esterno, producono la cosiddetta *radioattività naturale*, dovuta a isotopi radioattivi contenuti nelle rocce stesse. Cuore è stato schermato da questo fondo, usando diversi materiali *radiopuri*, caratterizzati cioè da una radioattività naturale molto bassa. In particolare lo strato più vicino al rivelatore di segnale (i cristalli di diossido di tellurio) è stato realizzato con piombo antico di origine romana, recuperato pochi anni fa dal fondo del mare sardo, dove era rimasto per più di duemila anni dopo un naufragio: essere stato al riparo così a lungo dai raggi cosmici rende questo piombo lo schermo più radiopuro disponibile oggi.

senza neutrini. Già agli inizi degli anni 2000, la ricerca è stata condotta da alcuni esperimenti: da Cuoricino, il prototipo di Cuore (vd. approfondimento), e Heidelberg-Moscow, entrambi ai Laboratori del Gran Sasso, e da Nemo3 nei laboratori sotterranei del Fréjus in Francia. In tutti questi esperimenti sono state usate specie atomiche e tecniche sperimentali diverse, che hanno permesso di sviluppare e mettere a punto i metodi innovativi impiegati dagli esperimenti che inizieranno a prendere i dati nei prossimi anni. Oltre a Cuore, che usa il tellurio e inizierà a prendere dati nel 2015, ci sono Gerda, sempre nei Laboratori del Gran Sasso, che impiega germanio e che schermo il rivelatore usando argon liquido, il giapponese Kamland-Zen, che impiega xenon, e infine Exo, negli Stati Uniti, che usa le proprietà scintillanti dello xenon insieme a un

ingegnoso sistema di tracciamento degli elettroni. È ben possibile che nei prossimi anni riusciremo a scoprire almeno un decadimento doppio beta senza neutrini, chiara indicazione di nuova fisica oltre il modello standard, che aprirà la strada a una stagione di nuove misure. Potrebbe anche succedere che nessuno degli esperimenti in funzione riesca nel suo scopo. In entrambi i casi sarà necessario sviluppare rivelatori ancora più sensibili al segnale e ancora più capaci di rigettare il fondo: il progetto Lucifer ha già raccolto questa sfida del domani e svilupperà, presso i Laboratori del Gran Sasso, un prototipo di rivelatore innovativo. Molti degli esperimenti alla ricerca del decadimento doppio beta senza neutrini, come Cuore, operano in condizioni di estremo freddo ma, come ci ricorda il nome di Lucifer, la sfida si preannuncia molto calda.

Biografia

Fabio Bellini è ricercatore presso il Dipartimento di Fisica della Sapienza. Dottorato nell'esperimento Babar, dal 2006 si è dedicato alla ricerca del doppio decadimento beta senza neutrini negli esperimenti Cuoricino, Cuore e Lucifer di cui è responsabile nazionale.

Link sul web

<http://crio.mib.infn.it/wigmi/pages/cuore.php>

<http://www.lngs.infn.it>

Note gravi

In ascolto delle onde gravitazionali

di Eugenio Coccia

a.
Simulazione di un'onda
gravitazionale.

La gravitazione è la più debole interazione fondamentale, la più antica conosciuta dall'uomo e ancora per molti versi la più misteriosa. Per studiare la sua natura, racchiusa nelle informazioni che ci possono fornire le onde gravitazionali, i cui segnali sono così deboli da non essere finora mai stati rivelati, i fisici costruiscono sofisticatissimi esperimenti, alla frontiera della scienza e della tecnologia.

La gravità è stata protagonista della prima grande sintesi nello studio della natura, quella operata nel '600 da Newton tra i fenomeni terrestri e i fenomeni celesti. Una pietra cade a terra, la Terra gira intorno al Sole e vede, a sua volta, ruotare attorno a sé la Luna. Tutti questi fenomeni sono dovuti all'azione di una stessa forza che attira i corpi fra loro e che agisce allo stesso modo dovunque nel cosmo: la forza di gravità. La legge che descrive l'azione di questa forza, da allora, si chiama giustamente *legge di gravitazione universale*. Nel '900 Einstein ha trasformato questa visione delle cose, creando un'indissolubile unione tra gravità, spazio e tempo. La presenza di materia deforma, "curva", lo spaziotempo, come se questo fosse un tappeto elastico. I corpi si attirano tra loro come conseguenza di questa curvatura. La teoria della gravitazione di Einstein, la *relatività generale*, ha avuto varie conferme sperimentali, tra cui la verifica che anche i raggi luminosi seguono questa curvatura. Manca però ancora la conferma più spettacolare e carica di significato: la rivelazione delle onde gravitazionali. Il movimento della materia è in grado di generare nel nostro tappeto elastico deformazioni e vibrazioni che, viaggiando nello spazio come onde in uno stagno, portano in tutto il cosmo informazioni sul movimento e sulla natura delle sorgenti che le hanno generate: sono queste le onde gravitazionali. Si tratta di perturbazioni dello spaziotempo che viaggiano alla velocità della luce e che possono essere rivelate misurando la variazione della distanza tra due corpi. Le onde gravitazionali cercate dai fisici sono emesse da corpi estremi, disseminati nell'universo come nere perle nel vuoto: i buchi neri e le stelle di neutroni, in cui le densità sono elevatissime e la gravità prevale sulle altre forze. Ma potrebbero essere generate anche da sorgenti ancora sconosciute: spesso, in fisica, quando si è aperta una nuova finestra sull'universo, si sono scoperte sorgenti assolutamente impensate. La rivelazione e lo studio delle onde gravitazionali permetterà non solo di trovare un'ulteriore

conferma della relatività generale di Einstein, ma segnerà anche l'inizio di una nuova astronomia.

Né i telescopi che osservano i fotoni, né i rivelatori di raggi cosmici o di neutrini (vd. p. 15) possono fornire un racconto così dettagliato del movimento della materia cosmica in condizioni estreme. Niente può dirci che cosa è accaduto nell'universo subito dopo il Big Bang meglio dell'eco delle onde gravitazionali, generata molto prima di quella dei fotoni (vd. p. 33). Sono numerose e affascinanti le domande che potrebbero avere una risposta grazie allo studio delle onde gravitazionali. Ad esempio, si potrebbe sapere se la relatività generale è la corretta teoria della gravitazione, se rimane valida anche in condizioni di forte gravità e se la velocità delle onde è quella della luce, se i buchi neri esistono veramente e se sono come la relatività generale li descrive, come si comporta la materia nucleare a densità e pressioni enormi, irrealizzabili nei nostri laboratori, e se le stelle di neutroni sono tali o non, piuttosto, *stelle di quark*. Per questo la rivelazione delle onde gravitazionali è una sfida che vale la pena di affrontare.

Ed è una sfida difficilissima per i fisici sperimentali. Queste onde attraversano la materia praticamente senza fermarsi e catturarle è quindi un compito davvero arduo. Sono ancora più elusive dei neutrini o delle particelle della materia oscura, tanto per citare altre sfide che vedono impegnati fior di cacciatori.

Per studiare le onde gravitazionali sono stati costruiti i più sensibili strumenti oggi concepibili.

Si è iniziato negli anni '60 con la progettazione delle *antenne risonanti* (vd. Asimmetrie n. 5 p. 23, ndr), formate da grandi cilindri metallici sospesi e poi raffreddati, a partire dagli anni '90, a temperature vicine allo zero assoluto grazie all'uso di tecnologie quantistiche. Come sensibilissimi diapason, queste antenne sono state progettate per "risuonare" al passaggio di un'onda gravitazionale. Ma la loro sensibilità non è stata sufficiente.

Gli anni 2000 hanno visto l'affermarsi dei sensibilissimi interferometri laser, come Virgo, costruito dall'Infn assieme al Cnrs (il centro della ricerca scientifica francese) nei pressi di Pisa. Sono straordinari strumenti, progettati per rivelare le onde gravitazionali emesse da sorgenti lontane anche centinaia di milioni di anni luce, che devono la loro stupefacente sensibilità all'uso estremo delle tecnologie laser, ottiche, elettroniche e meccaniche.



b.
Uno dei due bracci
dell'interferometro Virgo,
nell'osservatorio Ego (European
Gravitational Observatory) dell'Infn
e del Cnrs a Cascina, Pisa.

Virgo è formato da due tunnel perpendicolari (detti “bracci”) lunghi 3 chilometri, in cui vengono iniettati fasci laser, continuamente riflessi da sofisticati specchi posti alle estremità dei bracci. Il passaggio di un’onda gravitazionale deforma alternativamente lo spazio nelle due direzioni perpendicolari e quindi modifica la lunghezza dei due bracci. Di conseguenza, varia la fase relativa dei due fasci laser, che può essere misurata osservando la loro interferenza al termine del percorso (vd. *Asimmetrie* n. 5 p. 17, ndr). Virgo è in grado di misurare una variazione di lunghezza dei bracci a livello del milionesimo di milionesimo di metro, che è come se si volesse cercare una variazione più piccola dello spessore di un capello nel misurare la distanza tra la Terra e Giove.

Negli Usa è stato contemporaneamente costruito il “fratello” di Virgo, l’interferometro Ligo (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory). La sensibilità di entrambi i rivelatori verrà presto migliorata grazie ai progetti *Advanced Virgo* e *Advanced Ligo*: con grande probabilità si potranno identificare i primi segnali di onde gravitazionali entro pochi anni, forse già a partire dal 2016, a cento anni esatti dalla predizione teorica di Einstein. Nella prossima decade si prevede di realizzare un nuovo interferometro di 10 chilometri di lunghezza, situato sotto terra per ridurre l’effetto del rumore sismico e delle variazioni del campo gravitazionale, e costruito con specchi raffreddati a bassa temperatura per ridurre il rumore termico: si tratta di un ambizioso progetto chiamato Einstein Telescope (Et). Un altro progetto per il futuro,

di grande fascino, è l’interferometro spaziale Lisa. Sarà costituito da tre satelliti artificiali dotati di laser, disposti in modo da formare un triangolo equilatero di 5 milioni di chilometri di lato, che orbiteranno attorno al Sole a una distanza di circa 150 milioni di chilometri. Potrà studiare in dettaglio sorgenti “lente”, che emettono onde di frequenza minore rispetto a quelle misurabili dagli interferometri a terra, quali i buchi neri supermassicci che si trovano al centro delle galassie, e forse potrà captare l’eco gravitazionale del Big Bang. Rivelatori estremi in siti estremi: una rete di strumenti sofisticatissimi è pronta a catturare le “note” della gravità.

Biografia

Eugenio Coccia è professore di fisica all’Università di Roma Tor Vergata, è stato direttore dei Laboratori del Gran Sasso e oggi è direttore del Gran Sasso Science Institute (Gssi), scuola internazionale di dottorato e centro di studi avanzati dell’Infn. Dirige l’esperimento di onde gravitazionali Nautilus e partecipa all’esperimento Virgo. È presidente del comitato internazionale delle onde gravitazionali e consigliere della Società Europea di Fisica.

Link sul web

<http://www.ego-gw.it/>

<http://www.ligo.caltech.edu/>

<http://www.et-gw.eu/>

<http://lisa.nasa.gov/>

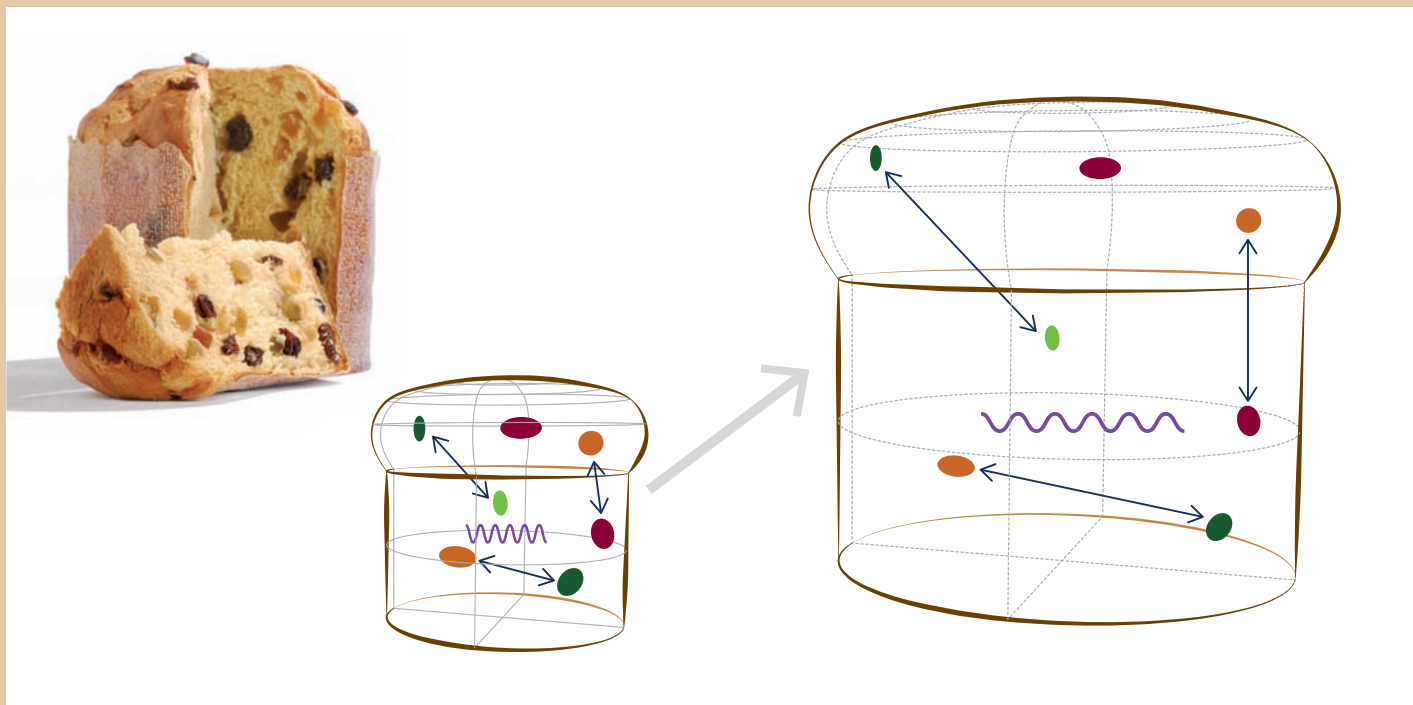
Foto d'epoca

Immagini dal passato remoto dell'universo

di Paolo De Bernardis

a.

L'effetto dell'espansione dell'universo può essere interpretato immaginando un panettone in fase di lievitazione, i cui canditi rappresentano gli oggetti cosmici (dalle stelle agli ammassi di galassie). Mentre il panettone lievita, la distanza tra i canditi aumenta man mano che cresce il raggio: analogamente, tutti gli oggetti cosmici si allontaneranno uno dall'altro con il passare del tempo, e qualunque altra lunghezza, inclusa la lunghezza d'onda di un'onda elettromagnetica che viaggia per miliardi di anni, risulterà dilatata.



Ricevere immagini che provengono da regioni molto lontane dell'universo significa riuscire a osservarne il passato. Alla pazzesca velocità di un miliardo di chilometri all'ora, la luce proveniente dalle galassie più lontane impiega miliardi di anni per arrivare fino a noi. Osservando galassie sempre più distanti, i cosmologi possono studiare il passato sempre più remoto dell'universo. E si può osservare oltre ancora, la radiazione prodotta prima della formazione delle galassie. Fino a quale passato estremo è possibile spingersi?

A causa dell'espansione dell'universo tutte le lunghezze cosmologiche si allungano con il tempo (vd. fig. a). Anche le lunghezze d'onda della luce che percorre il cosmo. Più lontana è la galassia, più a lungo avrà viaggiato la sua luce che stiamo osservando, più si sarà espanso l'universo nel frattempo e

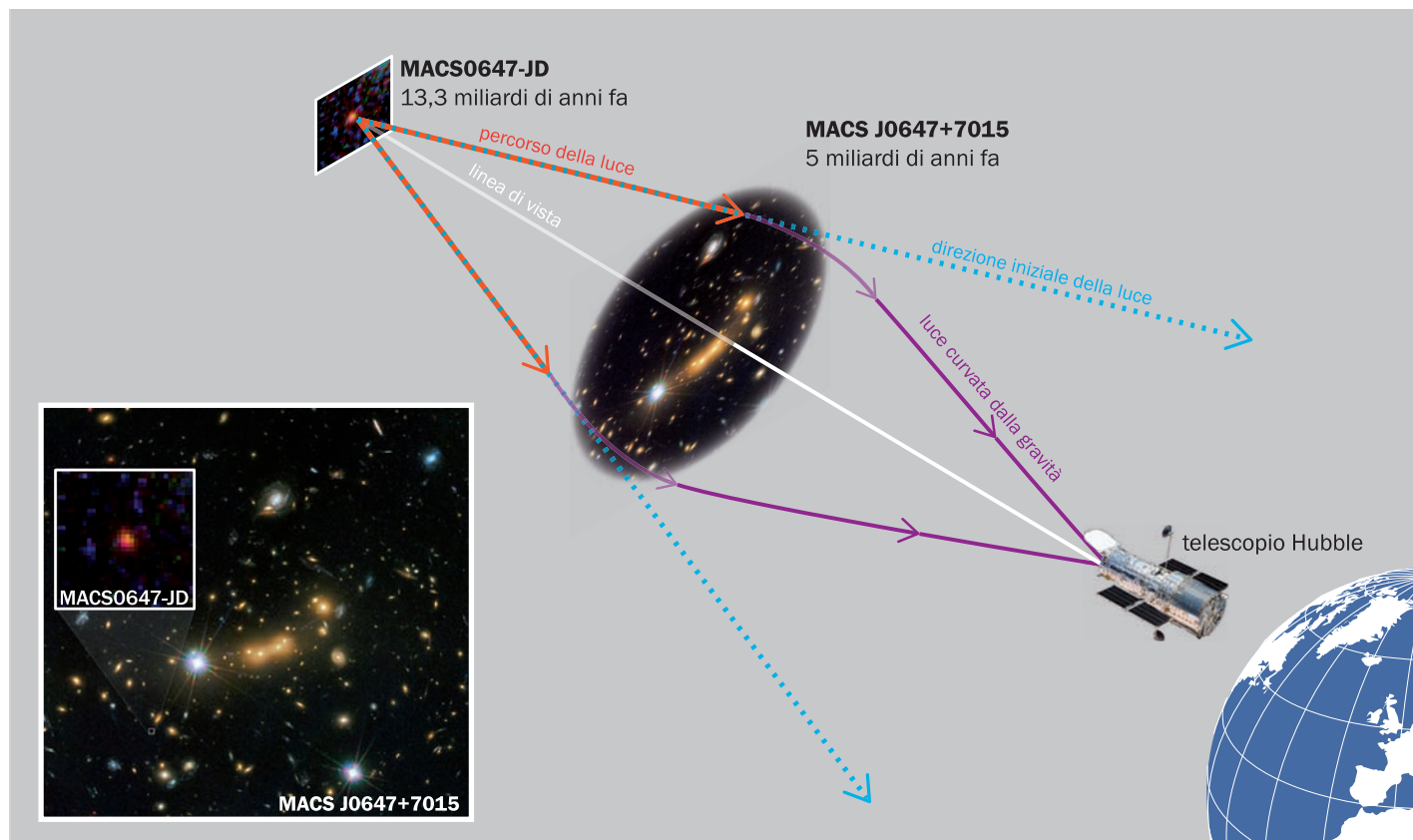
maggiore sarà la lunghezza d'onda ricevuta. La luce blu, prodotta dalle stelle calde in galassie lontane, allunga la sua lunghezza d'onda proporzionalmente all'espansione che l'universo ha subito, tra emissione e ricezione della luce, e diventa gradualmente luce rossa, o infrarossa. È un fenomeno noto come *redshift cosmologico* (dall'inglese *shift*, spostamento, quindi "spostamento verso il rosso"). Per osservare una galassia molto lontana, è quindi necessario usare complessi rivelatori a infrarossi, raffreddati a temperature criogeniche per ridurne il rumore (ossia i disturbi dovuti all'agitazione termica dei sensori). Inoltre, pur essendo le galassie intrinsecamente luminose (centinaia di miliardi di stelle che splendono simultaneamente!), le loro enormi distanze rendono il flusso luminoso ricevuto a terra

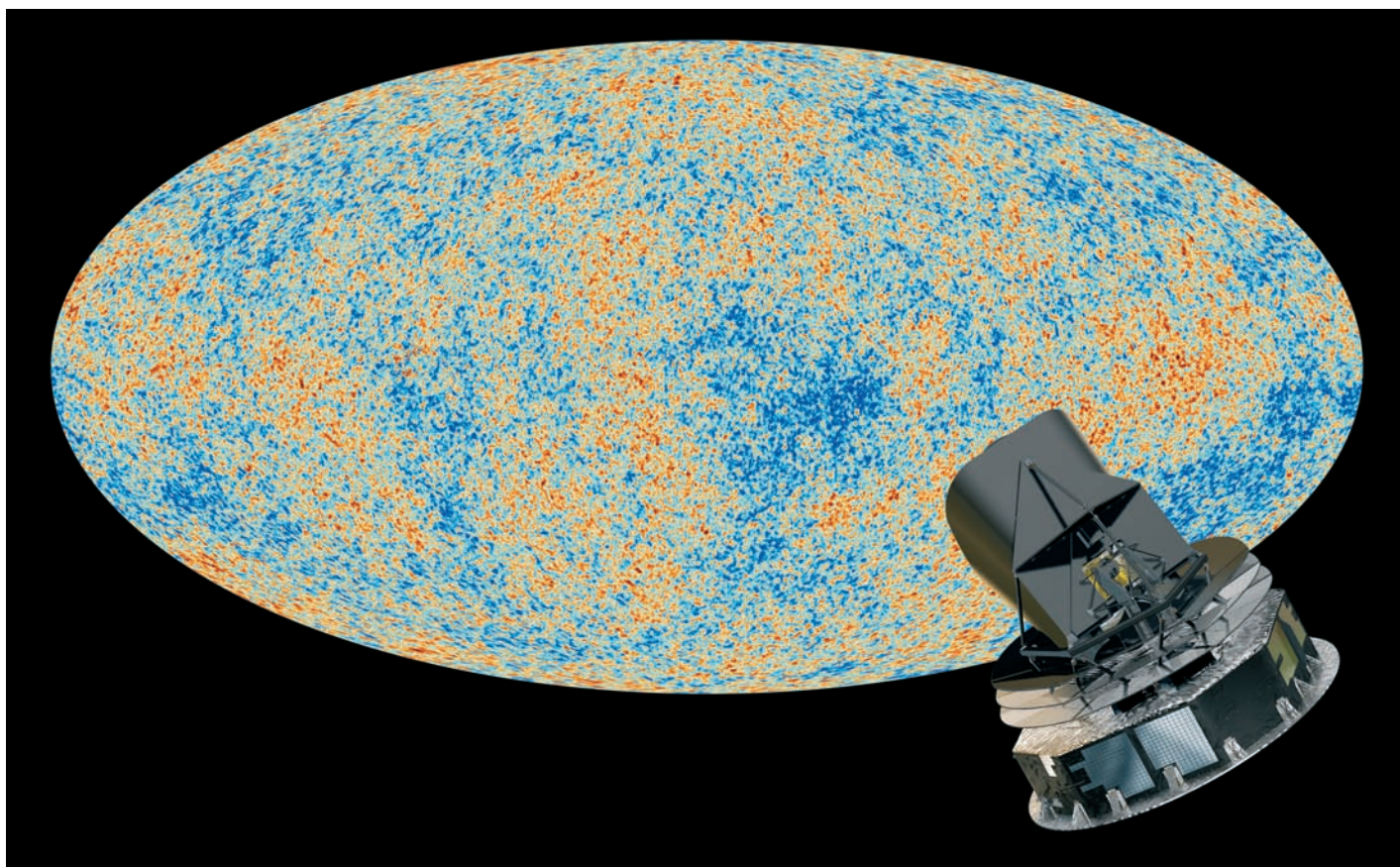
estremamente debole. Servono grandi telescopi per raccogliere abbastanza potenza luminosa da sovrastare il rumore dei sensori. Per le galassie più lontane, i cosmologi hanno imparato a sfruttare gli ammassi di galassie (che contengono enormi addensamenti di massa) come *lenti gravitazionali* (vd. fig. b), che deviano verso l'osservatore la luce proveniente dalle galassie retrostanti. In assenza dell'ammasso, la maggior parte di questa luce avrebbe continuato il suo percorso rettilineo, diretta verso regioni via via più lontane dall'osservatore, mancandolo quindi inesorabilmente. Ad oggi, l'oggetto più lontano mai osservato è la galassia MACS0647-JD (vd. fig. b): la riga Lyman- α (una delle componenti caratteristiche dello spettro dell'idrogeno) che viene emessa da questa galassia nell'ultravioletto a una lunghezza d'onda di 0,12 m, arriva a noi a una lunghezza d'onda di 1,46 m, implicando che nel frattempo l'universo si è espanso di 12 volte.

Stiamo vedendo questa galassia come era 13,3 miliardi di anni fa, quando l'universo aveva solo il 3% della sua età attuale ed

erano passati "solo" 420 milioni di anni dal Big Bang. MACS0647-JD ha un diametro di 600 anni luce (oggi, dopo oltre 13 miliardi di anni, una galassia "nana" ha un diametro di 15.000 anni luce) ed è irregolare. È una delle prime aggregazioni di materia che, in quella remota regione di universo, nei miliardi di anni seguenti, formeranno le galassie. Per osservare il passato ancora più remoto dell'universo, dobbiamo guardare a distanze ancora maggiori. La radiazione che riceveremo avrà lunghezze d'onda nel lontano infrarosso o nelle microonde. E dobbiamo anche considerare che l'espansione di un sistema isolato implica sempre un raffreddamento. Man mano che ci inoltriamo nel passato remoto dell'universo, esploreremo quindi fasi nelle quali la temperatura era sempre più elevata. A temperature superiori a qualche migliaio di gradi, elettroni e nuclei non sono legati in atomi, ma liberi, e diffondono efficientemente la luce. Di conseguenza in quella fase, detta *primeval fireball* ("palla di fuoco primordiale"), l'universo è opaco, come una nebbia incandescente che ci impedisce di osservare più lontano.

b.
In basso a sinistra, l'immagine di un lontano ammasso di galassie (dal nome MACS J0647+7015) osservato per lungo tempo con il telescopio spaziale Hubble. L'enorme quantità di materia oscura presente nell'ammasso agisce come lente gravitazionale e fa convergere verso di noi la luce proveniente dalle galassie retrostanti (come visualizzato al centro della figura). Tra queste, la galassia MACS0647-JD, visibile nel riquadro, è la più lontana mai osservata. La sua luce arriva a noi oggi essendo partita 13,3 miliardi di anni fa.





Queste condizioni si verificano nei primi 380.000 anni dopo il Big Bang: tramite la luce possiamo sondare l'universo per 13,7 miliardi di anni nel passato, arrivando a "soli" 380.000 anni dal Big Bang, ma non oltre. Data la elevata temperatura, dalla fase *primeval fireball* si sono liberati luce visibile e raggi ultravioletti che, a causa del redshift, si sono trasformati oggi in flebili microonde. Scoperto nel 1965, il *fondo cosmico di microonde* (CMB, Cosmic Microwave Background) rappresenta la conferma diretta della *primeval fireball*. Ne è stata misurata la distribuzione di energie con un'enorme precisione (misura per la quale John Mather ha ottenuto il premio Nobel nel 2006). L'esperimento Boomerang nel 2000 ha rivelato l'esistenza di regioni leggermente più calde e leggermente più fredde e, successivamente, l'esperimento Planck, grazie alla sua maggiore risoluzione, ha permesso uno studio molto più dettagliato di queste anisotropie (vd. approfondimento p. 35). Planck ha stabilito per la prima volta quante delle microonde ricevute provengono dall'universo primordiale, quante dallo spazio

extragalattico, quante dalla nostra galassia e quante dallo strumento stesso. Motivo per cui la mappa di Planck del fondo cosmico di microonde è la più accurata, dettagliata e affidabile mai realizzata.

In linea di principio esistono anche dei metodi per sondare l'universo ancora più primordiale. Uno, indiretto, è lo studio delle abbondanze degli elementi. I nuclei più leggeri (idrogeno, deuterio, elio e litio) si sono formati, infatti, nei primi tre minuti dopo il Big Bang, quando la temperatura era così alta da permettere reazioni di fusione termonucleare.

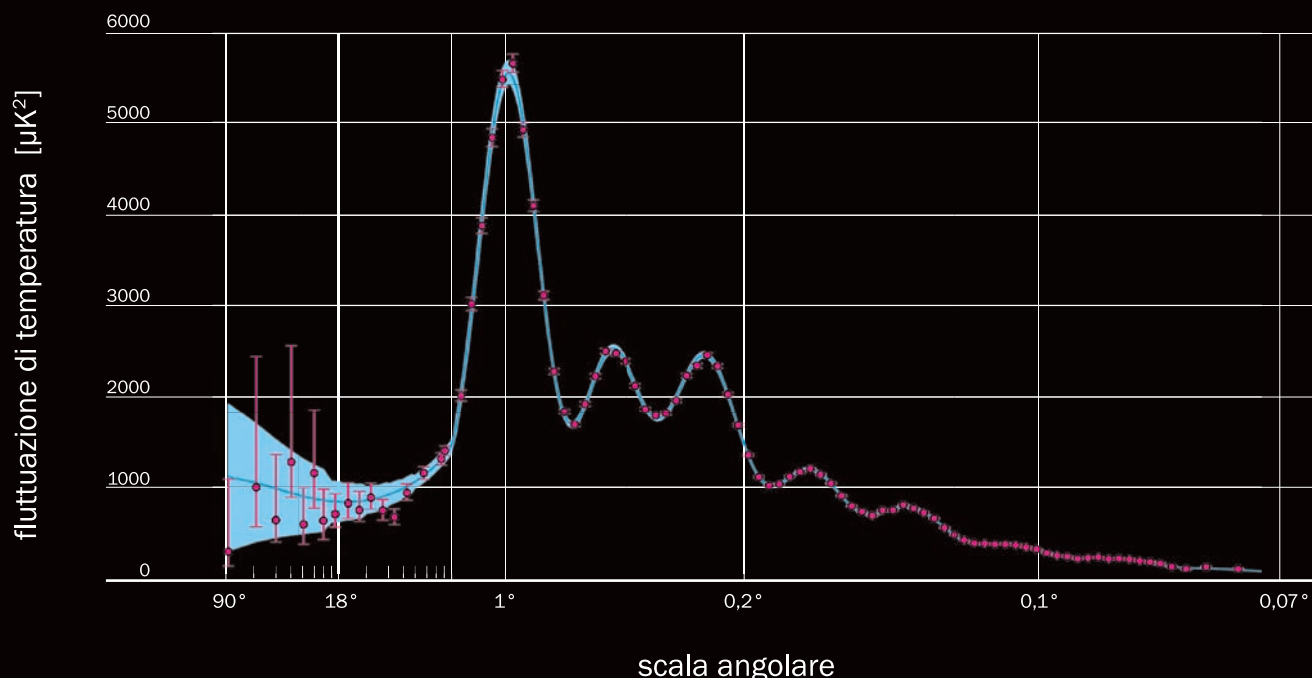
Usando la fisica nucleare è possibile stabilire le abbondanze dei diversi prodotti delle fusioni. Osservando nubi ancora non contaminate dalla presenza di stelle (che fondono i nuclei leggeri, creando nuclei più pesanti) si può ottenere un'ulteriore verifica della teoria del Big Bang. Un altro metodo indiretto è lo studio dello stato di *polarizzazione* (vd. Asimmetrie n. 12, approfondimento p. 9, ndr) del fondo cosmico di microonde. Se davvero c'è stata l'inflazione, si sono prodotte onde gravitazionali di grandissima lunghezza d'onda, che

c. Mappa dell'universo primordiale ottenuta dal satellite Planck (la cui immagine è stata aggiunta alla mappa), tramite misure del fondo cosmico di microonde. Le macchie rosse e blu rappresentano piccole fluttuazioni di temperatura del gas incandescente che riempiva l'universo 13,7 miliardi di anni fa, 380.000 anni dopo il Big Bang: le parti blu sono le parti più fredde, le parti rosso-arancioni quelle più calde. Queste fluttuazioni potrebbero essersi generate nel periodo dell'inflazione (vd. p. 37) pochi attimi dopo il Big Bang. Dalle risultanti fluttuazioni di densità si formeranno poi tutte le strutture cosmiche (galassie, ammassi di galassie, superammassi).

Un accordo entusiasmante

1.

Lo spettro di potenza della mappa del fondo cosmico di microonde di fig. c. In funzione delle dimensioni angolari delle fluttuazioni di temperatura, è riportata l'entità delle fluttuazioni. La successione di picchi è dovuta alle oscillazioni del gas incandescente di materia e luce che riempiva l'universo 13,7 miliardi di anni fa. I punti rossi rappresentano i dati sperimentali, le barre rosse i loro errori di misura. La linea blu rappresenta la previsione teorica, che risulta perfettamente in accordo con i dati.



Il telescopio Planck, che si trova a 1,5 milioni di chilometri dalla Terra, ha perlustrato il cielo in lungo e in largo, registrando la luce proveniente dall'intero universo (nelle frequenze comprese tra 30 e 857 GHz). La radiazione cosmica di fondo presenta un'elevata isotropia, ovvero un'elevata omogeneità in tutte le direzioni. Guardando la mappa di Planck in fig. c potrebbe non sembrare così, ma le minuscole disomogeneità che si possono osservare corrispondono in realtà a piccolissime fluttuazioni di temperatura, minori di una parte su 10.000, e sono il riflesso delle fluttuazioni di densità e temperatura dell'universo primordiale. L'analisi dell'entità di queste fluttuazioni di temperatura in funzione delle loro dimensioni

angolari (vd. fig. 1) conferma in maniera spettacolare il modello standard cosmologico, basato su pochi parametri: il tasso di espansione dell'universo, le quantità relative della radiazione, della materia normale, della materia oscura e dell'energia oscura e un indice che descrive le fluttuazioni iniziali di densità all'origine delle strutture cosmiche. Alcuni di questi parametri sono empirici: non abbiamo ancora una descrizione fisica soddisfacente della materia oscura, dell'energia oscura e nemmeno dei processi che provocano le fluttuazioni iniziali di densità, che potrebbero trovare una spiegazione nella teoria dell'inflazione. Ma l'accordo tra i dati e il modello, come mostra la figura, è entusiasmante.

determinano una caratteristica configurazione di polarizzazione del fondo cosmico di microonde. Se si riuscissero a eseguire misure ultraprecise di questa configurazione, potremmo confermare l'ipotesi dell'inflazione e stabilirne l'energia (stiamo parlando di scale intorno ai 10^{19} GeV, tipiche dei primi istanti dopo il Big Bang, non raggiungibili dagli acceleratori di particelle, ma interessantissime per la fisica fondamentale). Per fare questo servirebbe una missione spaziale per lo studio del fondo cosmico di microonde di nuova generazione, come Core (Cosmic ORigin Explorer) e Prism (Polarized Radiation Imaging and Spectroscopy Mission), proposte di recente. L'osservazione diretta sembra invece di là da venire. I neutrini "cosmologici" (di bassissima energia) e le onde gravitazionali possono attraversare la *primeval fireball* senza interazioni apprezzabili. Ma proprio perché interagiscono così poco con la materia, dovremo aspettare molti anni prima di riuscire a sviluppare astronomie basate su questi evanescenti portatori di informazione.

Biografia

Paolo de Bernardis è professore di astrofisica all'Università di Roma La Sapienza. La sua ricerca è focalizzata sul fondo cosmico di microonde: ha coordinato l'esperimento Boomerang e ha contribuito all'esperimento Hfi a bordo del satellite Planck. È membro dell'Accademia dei Lincei e autore di più di 300 pubblicazioni specialistiche e del libro divulgativo "Osservare l'Universo" (Il Mulino, 2010).

Link sul web

<http://www.inaf.it>
<http://www.vialattea.net/cosmo/>
<http://map.gsfc.nasa.gov/>
<http://www.satellite-planck.it/>
www.core-mission.org
www.prism-mission.org

[as]

Crescita in tempi di inflazione.

L'universo che osserviamo oggi è un luogo molto disomogeneo: la massa visibile è concentrata in "isole di materia" ad alta densità, le galassie e gli ammassi di galassie, circondate da enormi regioni vuote. Anche la materia oscura ha una distribuzione simile: la densità degli aloni di materia oscura che circondano le galassie è tipicamente un milione di volte più alta della densità media di tutto l'universo.

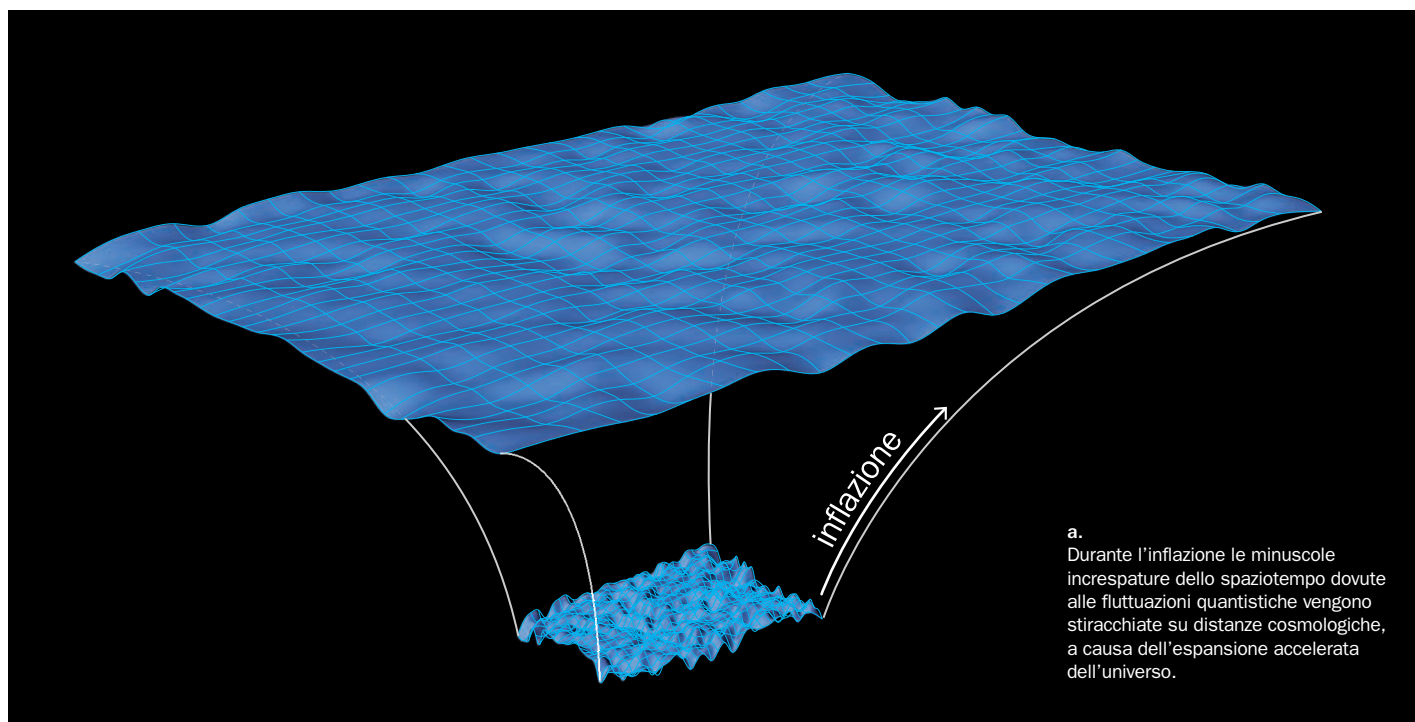
Nelle prime fasi dell'evoluzione dell'universo però la situazione era molto diversa. La mappa del fondo cosmico di microonde mostra un universo che, tredici miliardi di anni fa, era estremamente omogeneo: la differenza relativa tra le densità di due diverse regioni era, tipicamente, solo dello 0,001%.

L'evoluzione dall'universo omogeneo "fotografato" dal fondo cosmico di microonde e quello disomogeneo osservato oggi è spiegata molto bene dal modello cosmologico standard. Le regioni inizialmente più dense attraggono materia dalle regioni circostanti, diventando

sempre più dense e compatte, mentre le regioni vuote cedono sempre più massa e aumentano di volume a causa dell'espansione dell'universo. Resta però da capire come abbiano avuto origine le piccolissime disomogeneità iniziali da cui, nel corso di tredici miliardi di anni, si sono formate le strutture cosmiche. Oggi si pensa che queste fluttuazioni primordiali della densità siano state prodotte in un'epoca molto antecedente a quella della formazione del fondo cosmico di microonde: l'epoca dell'inflazione. In questa fase dell'evoluzione cosmologica, la velocità di espansione dell'universo aumenta esponenzialmente nel tempo, a differenza di quello che succede per la maggior parte della sua evoluzione successiva, in cui l'espansione rallenta a causa della natura attrattiva della forza di gravità (per poi ricominciare ad accelerare solo di recente, a causa dell'azione dell'energia oscura, vd. fig. c p. 7). Questa rapidissima espansione dell'universo (vd. fig. a) fa sì che due punti, inizialmente a distanze

microscopiche l'uno dall'altro, si ritrovino, alla fine dell'inflazione, a distanze cosmologiche.

La stessa sorte tocca alle *fluttuazioni quantistiche*. Queste sono minuscole increspature dello spaziotempo che in epoche "normali" rimangono confinate su scale microscopiche e vivono per tempi brevissimi. Durante l'inflazione, invece, le fluttuazioni quantistiche vengono espanse su scale cosmologiche e rimangono "congelate" fino a quando, una volta terminata l'inflazione, danno origine alle fluttuazioni di temperatura che vediamo nel fondo cosmico di microonde. I risultati di Planck, e degli esperimenti precedenti, sono in ottimo accordo con questo meccanismo per la produzione delle fluttuazioni primordiali, mentre hanno consentito di escludere diverse ipotesi alternative. L'obiettivo ora, anche attraverso lo studio della polarizzazione del fondo cosmico di microonde, è quello di mettere alla prova i dettagli dei diversi modelli che cercano di spiegare il meccanismo dell'inflazione. [Massimo Pietroni]



Scale di valori

Costanti di natura ed estremi di principio

di Vincenzo Barone

Citius, altius, fortius: “Più veloce, più in alto, più forte”. Il motto dei giochi olimpici potrebbe essere anche quello della fisica. Nella ricerca sui costituenti elementari del mondo, infatti, è naturale cercare di spingersi al di là di ogni limite: costruendo, per esempio, acceleratori sempre più potenti, in grado di raggiungere energie sempre più elevate e di esplorare regioni di spazio sempre più piccole.

Come lo sport, anche la fisica delle particelle elementari ha il suo libro dei primati. Ma, a differenza dello sport, in fisica ci sono dei record che, per

principio, non potranno mai essere battuti. Uno di questi riguarda la velocità dei corpi. In Lhc i protoni viaggiano a una velocità altissima, inferiore a quella della luce nel vuoto (circa 300.000 chilometri al secondo) per appena 3 metri al secondo. Questa minuscola barriera non potrà mai essere del tutto infranta. La ragione di tale impossibilità sta nella teoria della relatività ristretta di Einstein, secondo la quale nessun oggetto di massa diversa da zero può raggiungere la velocità della luce nel vuoto (tradizionalmente indicata con c), che è una costante fondamentale della natura.

La relatività ristretta, d'altra parte, non limita l'energia delle particelle. Questa può crescere indefinitamente, ma a ciò non corrisponde un aumento proporzionale della velocità. Se fra qualche decennio verrà realizzato il Very High Energy Lhc (Vhe-Lhc), un acceleratore capace di fornire ai protoni un'energia dieci volte superiore a quella di Lhc, la velocità di queste particelle crescerà di meno dello 0,000001% rispetto a quella attuale. Gli unici vincoli sull'energia sono quelli contingenti, dovuti alle dimensioni degli acceleratori e alla tecnologia su cui sono basati.



a.

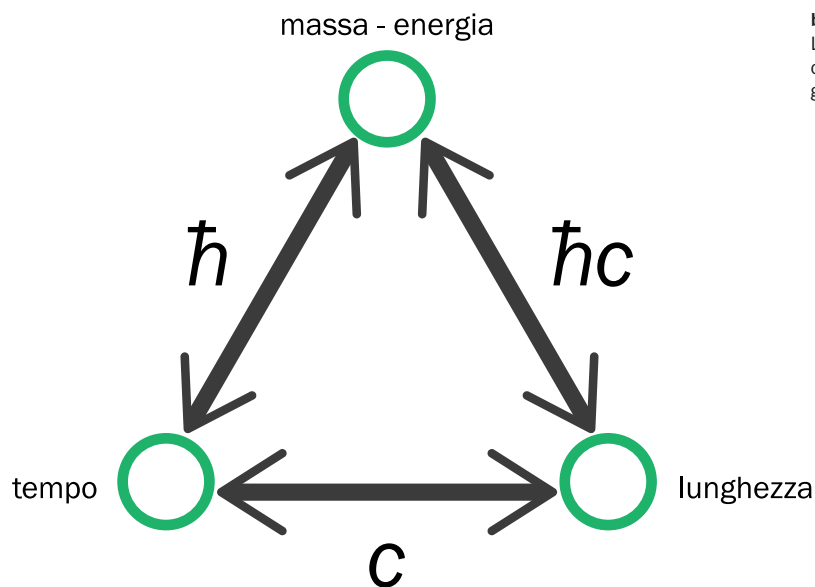
Usain Bolt detiene l'attuale record umano di velocità, circa 37,6 km/h. Il record naturale di velocità è invece fissato dalla relatività ristretta a 299.792,458 km/s ed è detenuto dalla luce e da tutte le particelle di massa nulla. Nessuna particella di massa diversa da zero può raggiungere questo limite.

Se la relatività pone un limite superiore al moto lineare, la meccanica quantistica pone un limite inferiore al moto oscillatorio. Essa prevede che il più piccolo quanto di oscillazione sia dato da un'altra costante fondamentale, la *costante di Planck* $\hbar$ (si legge "acca tagliato"). Siamo abituati a pensare che il movimento più lento sia la quiete, che ovviamente non ha niente di speciale e non costituisce certo un primato. Ma la fisica quantistica contraddice questa idea del senso comune. A causa del principio di indeterminazione di Heisenberg, infatti, una particella non può stare ferma in un punto definito. Un oscillatore, per esempio, non è mai a riposo nella sua posizione di equilibrio e ha un'energia minima proporzionale a $\hbar$.

Soffermiamoci ora su c e $\hbar$. La prima di queste due costanti, c , converte il tempo in spazio. Ecco perché le distanze celesti sono misurate in anni luce: quando diciamo, ad esempio, che la stella Proxima Centauri si trova a quattro anni luce dalla Terra, intendiamo dire che la sua distanza da noi è pari allo spazio percorso dalla luce in un tempo di quattro anni. La costante c converte anche l'energia in massa, secondo la famosa relazione di Einstein $E = mc^2$. Questo è il motivo per cui, se si vogliono produrre particelle molto pesanti (come il quark

top o il bosone di Higgs), bisogna studiare collisioni che avvengono ad alte energie. La costante di Planck $\hbar$, invece, converte il tempo, o meglio le frequenze, in energia. Se moltiplichiamo fra loro le due costanti, otteniamo una quantità, $\hbar c$, tipica delle teorie che sono sia quantistiche sia relativistiche. Teorie di questo tipo sono quelle che descrivono le interazioni nel mondo delle particelle elementari. La quantità $\hbar c$ converte l'energia in lunghezza. Raggiungere energie elevate significa esplorare regioni di spazio molto piccole: una particella si comporta, infatti, come una sonda, il cui potere di risoluzione è tanto più grande quanto più alta è la sua energia. Per esempio, un elettrone o un fotone di 100 GeV permettono di sondare una regione di spazio dell'ordine dei 10^{-17} metri. Gli acceleratori di particelle sono dunque anche potentissimi microscopi! Oltre a quelle che abbiamo menzionato, c'è in fisica una terza costante universale, la *costante di Newton* G , che compare nella legge di gravità. Avere a disposizione tre costanti ha un'importante conseguenza, legata al fatto che anche le grandezze fisiche fondamentali (massa-energia, lunghezza, tempo) sono tre. Se $\hbar$ e c permettono di convertire ognuna di queste grandezze in un'altra, mettendo assieme tutte e tre le

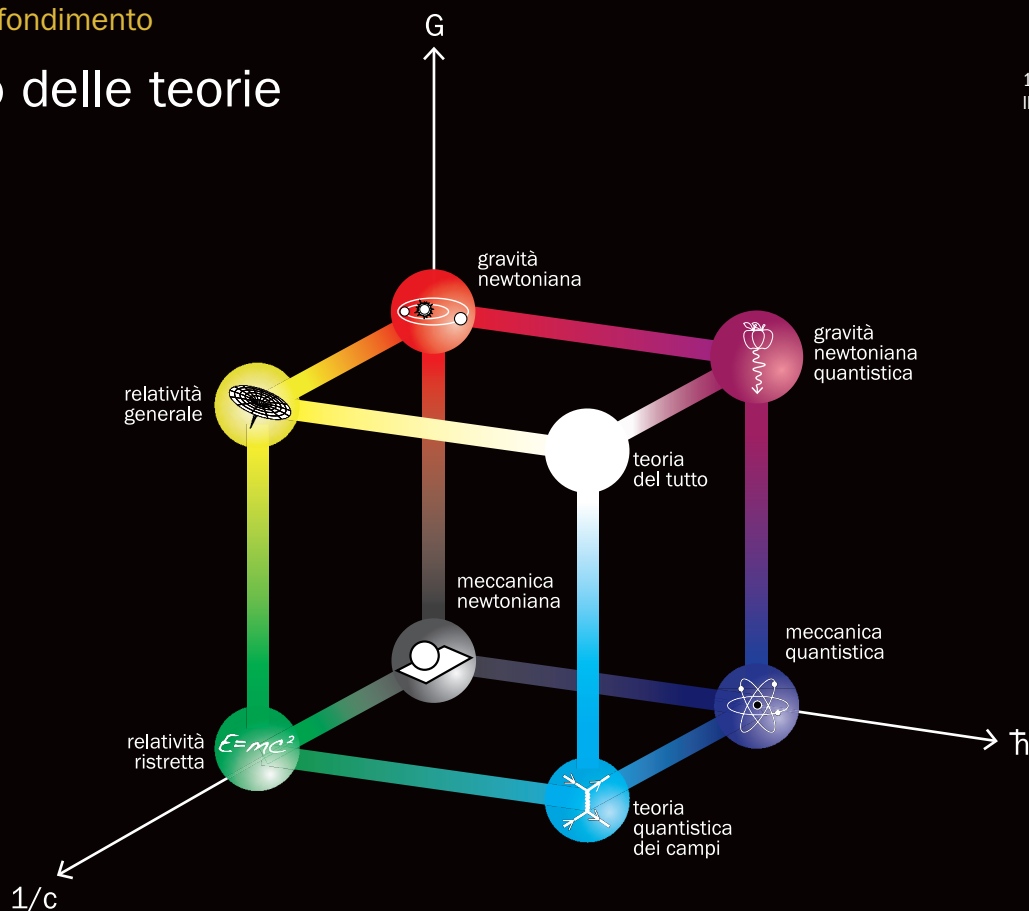
costanti otteniamo altrettante scale naturali del mondo. Combinando opportunamente $\hbar$, c e G possiamo, per esempio, costruire una lunghezza, detta *lunghezza di Planck*, che vale 10^{-35} metri. È questa la distanza spaziale alla quale la forza di gravità – che nel mondo ordinario è debolissima – diventa intensa quanto le altre tre forze fondamentali della natura (la forza elettromagnetica, la forza forte e la forza debole). Per avere un'idea della piccolezza di questa distanza, si pensi che se dilatassimo lo spazio in modo tale da far diventare gli atomi grandi quanto una galassia, la lunghezza di Planck corrisponderebbe più o meno al diametro di una capocchia di spillo. Per esplorare una regione di spazio delle dimensioni di 10^{-35} metri è necessario raggiungere energie dell'ordine di 10^{19} GeV, l'*energia di Planck*, un milione di miliardi di volte superiore alle energie degli attuali acceleratori (e presumibilmente ben al di là delle possibilità di quelli futuri). Ma una condizione così estrema si è verificata almeno una volta in natura: circa 14 miliardi di anni fa, all'inizio della storia dell'universo, ad appena 10^{-43} secondi (*tempo di Planck*) dal Big Bang. A quell'epoca, l'universo era straordinariamente denso e aveva una temperatura di 10^{23} gradi,



b.
Le costanti fondamentali $\hbar$ e c come fattori di conversione tra le grandezze fisiche fondamentali.

Il cubo delle teorie

1.
Il cubo delle teorie.



È possibile rappresentare l'insieme delle teorie della fisica fondamentale per mezzo di un artificio grafico, il cosiddetto *cubo delle teorie*, inventato da alcuni fisici russi nella prima metà del Novecento. L'idea è di riportare su tre assi perpendicolari le costanti universali $\hbar$, c e G (ma per motivi che capiremo subito, si preferisce usare, invece della velocità della luce c , l'inverso $1/c$). L'origine, lo "zero", di questa terna di assi corrisponde a valori nulli di $\hbar$, $1/c$ e G . Quando $\hbar$, $1/c$ e G valgono zero, si ha una teoria che non è quantistica, non è relativistica (perché $1/c$ uguale a zero significa che la velocità della luce tende a infinito – il

limite della fisica classica) e non descrive fenomeni gravitazionali: si tratta semplicemente della meccanica newtoniana. I valori non nulli di almeno una delle tre costanti individuano i vertici di un cubo. Ognuno di questi vertici rappresenta una teoria fisica: per esempio, il vertice corrispondente a $1/c$ e G uguali a zero e $\hbar$ diverso da zero rappresenta la meccanica quantistica non relativistica. Il vertice che per il momento rimane misterioso è quello corrispondente a valori diversi da zero di tutte e tre le costanti: è collocata lì la *teoria del tutto*, la teoria quantistica e relativistica di tutte le forze della natura, compresa la gravità.

corrispondente a un'energia media dei suoi costituenti pari all'energia di Planck. La comprensione dell'universo primordiale al tempo di Planck o, equivalentemente, dell'universo attuale alla lunghezza di Planck, richiederebbe una teoria quantistica unificata delle quattro forze, che ancora non possediamo. Le scale naturali di Planck rappresentano dunque una frontiera di

cui si conosce a priori l'esistenza, ma che, per il momento, non siamo in grado di descrivere con le teorie a nostra disposizione. Uno dei tentativi più promettenti in questa direzione è basato sull'idea che gli enti fisici elementari non siano corpuscoli puntiformi, ma oggetti estesi di dimensioni proprio dell'ordine della lunghezza di Planck, o di poco superiori. Questi oggetti sarebbero

piccolissime corde vibranti, le *stringhe*, le cui oscillazioni quantizzate darebbero origine alle particelle conosciute. Se così fosse – ma manca tuttora una teoria completa e coerente delle stringhe – non avrebbe senso spingersi a scale spaziali inferiori alla lunghezza delle stringhe e la scala di Planck sarebbe non solo un confine teorico, ma un limite reale del mondo.

Biografia

Vincenzo Barone insegna fisica teorica all'Università del Piemonte Orientale. La sua ricerca verte principalmente sulla fenomenologia delle interazioni forti. In ambito divulgativo, il suo ultimo lavoro è "L'ordine del mondo. Le simmetrie in fisica da Aristotele a Higgs" (Bollati Boringhieri, 2013).

Link sul web

www.arxiv.org/pdf/physics/0110060.pdf

www.mat.unimi.it/lezioniEnriques/2008/Enriques_Veneziano.pdf

www.cjwainwright.co.uk/maths/physicscube/

[as] spazi

Lo specchio magico.

di Eleonora Cossi

a.
Studenti a La Palma nel 2009,
durante il progetto Magic D, con i
tutori Elisa Prandini e Villi Scalzotto.

Enormi specchi, tra i più grandi del mondo, si trovano a 2200 metri di altitudine, sulla cima del vulcano Taburiente, nella verdissima isola di La Palma, nell'arcipelago delle Canarie. Stiamo parlando del Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescope (Magic), il sistema di telescopi costruiti per rivelare i raggi gamma di altissima energia, frutto di una collaborazione internazionale di 150 scienziati provenienti principalmente da Germania, Italia e Spagna: due paraboloidei di 240 metri quadrati ciascuno, ospitati dall'Osservatorio del Roque de Los Muchachos. Dal 2008 anche studenti delle scuole secondarie superiori e i loro docenti hanno l'opportunità di partecipare a questa grande impresa, grazie al progetto di formazione scientifica Magic D (dove "D" sta per "didattico") della sezione Infn di Padova.

Il progetto nasce all'interno del Piano Lauree Scientifiche (PLS) finanziato dal Ministero dell'Istruzione, dell'Università e della Ricerca (Miur), in collaborazione con l'Ufficio Scolastico Regionale per il Veneto e il Dipartimento di Fisica dell'Università di Padova. Per realizzarlo sono stati coinvolti tutti i licei del Veneto e dal 2008 ad oggi vi hanno partecipato complessivamente 65 studenti e circa 30 docenti. Fino al 2010 Magic D prevedeva anche un suggestivo stage estivo presso l'Osservatorio del Roque de Los Muchachos.

"L'ultima edizione si è conclusa nel dicembre 2012 e ha coinvolto circa una cinquantina di studenti e una trentina di insegnanti", ci racconta il prof. Antonio Saggion, ideatore del progetto assieme alla prof.ssa Rossella Faraldo. "Magic D si articola in due fasi. La prima è dedicata alla formazione dei docenti, chiamati inizialmente a studiare il contesto scientifico, il funzionamento del telescopio e l'analisi dei dati, e successivamente a svolgere attività di laboratorio insieme ai ricercatori che lavorano nel gruppo Magic di Padova. In particolare gli insegnanti hanno lavorato alla misura della riflettività e della *point spread function*, caratteristiche che indicano l'efficienza e la qualità della superficie riflettente, ovvero dello specchio". Acquisite queste competenze, gli insegnanti sono pronti per trasferirle ai ragazzi nelle programmazioni didattiche, portando nozioni di ricerca avanzata direttamente in classe. Dopo aver portato i docenti dentro la fisica di Magic, arriva il momento di passare alla seconda fase, portando anche gli studenti nei laboratori dell'Infn. "Abbiamo chiesto ai docenti di selezionare gruppi di ragazzi per ogni turno, con cui lavorare qui ai Laboratori di Legnaro (Lnl) dove le misure vengono normalmente eseguite con i ricercatori", racconta Rossella Faraldo, responsabile della



didattica per il progetto Magic D. "Gli studenti hanno passato due giorni presso i nostri laboratori e hanno eseguito due esperimenti: la misura della *point spread function* degli specchi e la misura della velocità della luce; entrambi si sono svolti con la collaborazione e la supervisione dei ricercatori C. Shultz, E. Prandini, V. Scalzotto, ideatore anche dell'esperimento sulla velocità della luce. Nel primo esperimento i ragazzi hanno materialmente messo a punto l'apparato ottico, acquisito i dati in riflessione, sottratto il fondo e discusso il risultato. Nel secondo hanno usato uno specchio di Magic (sferico con 35 m di diametro) per riflettere i brevi impulsi luminosi generati da una sorgente", conclude Faraldo.

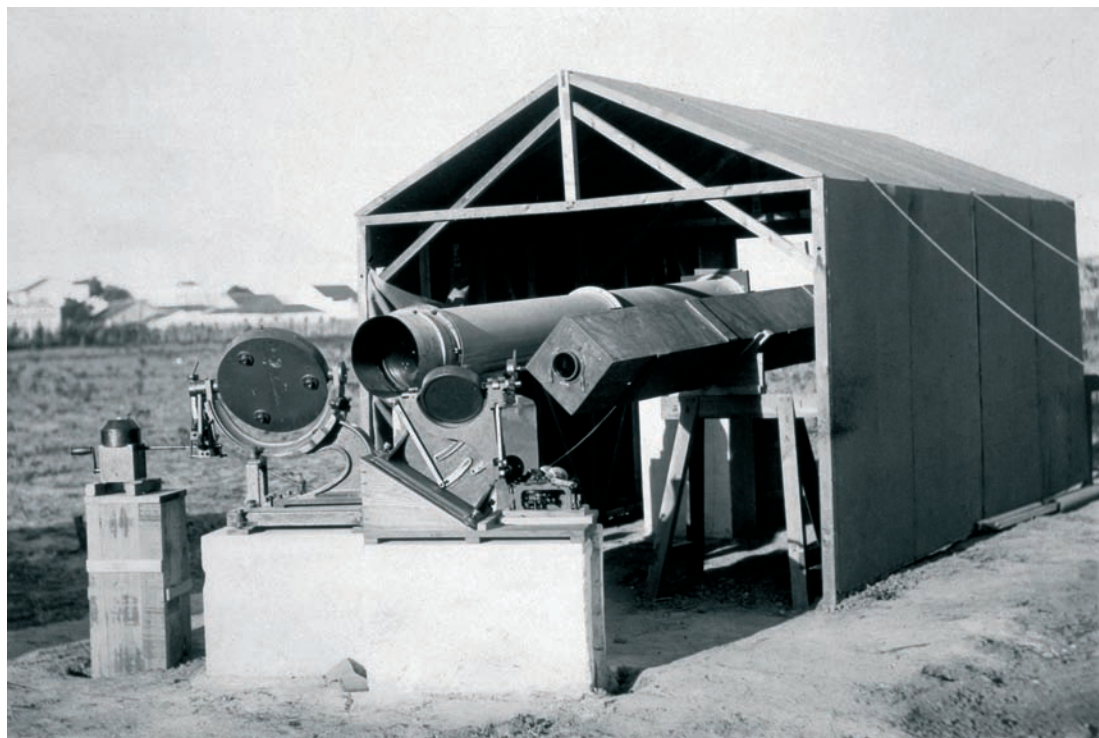
La formazione dei docenti, l'integrazione delle nozioni acquisite nei programmi didattici, la condivisione di un contesto lavorativo di ricerca, sia eseguendo gli esperimenti sia partecipando alla routine quotidiana di un grande laboratorio scientifico, l'approccio *hands-on* in cui gli studenti discutono e trovano con i ricercatori le soluzioni migliori sono le caratteristiche che contraddistinguono il progetto Magic D e che hanno permesso, in questi anni, di far sentire insegnanti e studenti parte di una grande collaborazione scientifica internazionale. La prossima edizione è prevista per la fine del 2013.

Cacciatori di eclissi.

di Eleonora Cossi

Il 7 novembre del 1919 il quotidiano britannico The Times pubblicò un articolo dal titolo *Revolution in Science, New Theory of the Universe, Newtonian Ideas Overthrown* ("Rivoluzione nella scienza. Nuova teoria dell'Universo: rovesciate le idee di Newton"). L'eccezionale notizia, ripresa dai quotidiani di tutto il mondo, raccontava l'avventurosa storia della conferma sperimentale di una delle predizioni della teoria della relatività generale di Einstein, la deflessione gravitazionale della luce. Le prove arrivavano da due luoghi remoti del pianeta: l'Isola di Principe nel golfo di Guinea e la città di Sobral nel nord del Brasile, entrambi sulla linea dell'equatore. La teoria della relatività generale, elaborata da Einstein nella sua versione definitiva tra il 1915 e il 1916, fu oggetto di grandi discussioni, scetticismi ed entusiasmi nella comunità scientifica, ma rimase in attesa di verifica fino alla fine della prima guerra mondiale. In quegli anni, l'unica possibilità per confermare l'esistenza di un effetto relativistico, compatibile con quello previsto, era offerta dalle eclissi totali di Sole, ma organizzare una spedizione durante la guerra era decisamente troppo rischioso.

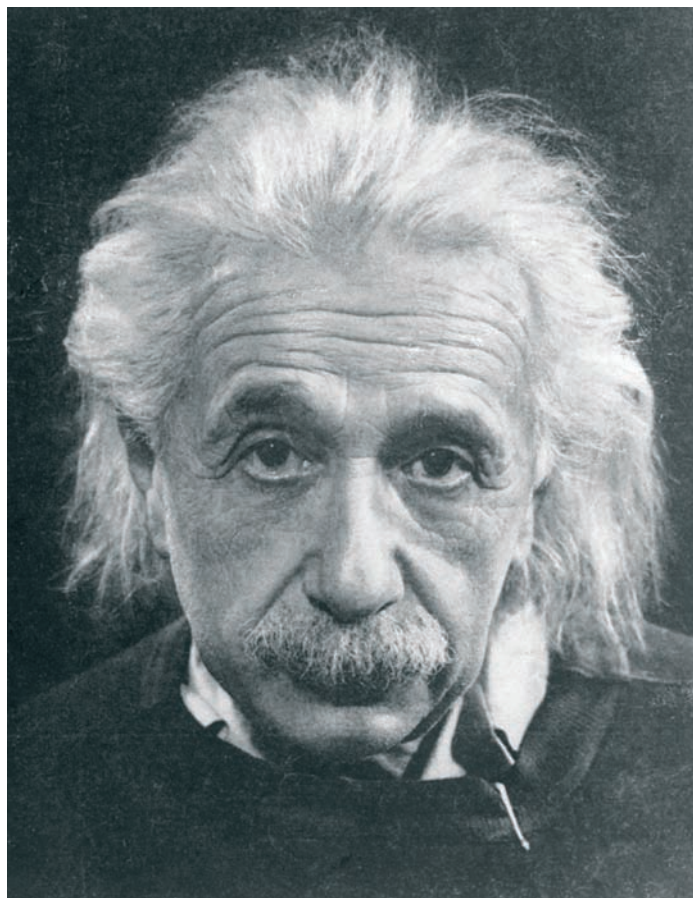
In Inghilterra Arthur Stanley Eddington, tra gli astrofisici più importanti del '900, fu uno dei primi studiosi a venire a conoscenza della nuova teoria, grazie all'intermediazione del collega Willem De Sitter che, vivendo in Olanda, allora neutrale, gli poté inviare gli articoli pubblicati da Einstein sulle riviste scientifiche tedesche. Eddington comprese pienamente la potenza rivoluzionaria della teoria einsteiniana e ne divenne un acceso sostenitore in patria; ed è proprio alla relatività generale che lo scienziato inglese deve la sua enorme popolarità e forse anche la vita. Eddington, infatti, quacchero e pacifista convinto, avendo rifiutato di arruolarsi in guerra rischiava una dura condanna. Ma a salvarlo fu Frank Dyson, astronomo reale, che lo mise a capo di una delle due spedizioni per l'osservazione dell'eclisse del 29 maggio 1919. In quella primavera due gruppi di astronomi britannici partirono per un'ambiziosa missione scientifica, che si proponeva di verificare la teoria di Einstein. Il primo, guidato da Eddington, era diretto all'Isola di Principe, a circa 250 chilometri dalla costa dell'attuale Gabon nell'Africa occidentale. Il secondo era guidato da Andrew Crommelin, astronomo di origine francese,



a.
La strumentazione utilizzata da Crommelin per osservare l'eclisse a Sobral, in Brasile.

che scelse come luogo di osservazione la cittadina di Sobral, nello stato del Ceará in Brasile. Le due località, collocate ai due estremi dell'oceano Atlantico, si trovavano in una posizione ideale per osservare l'eclisse del 29 maggio: il Sole oscurato avrebbe avuto come sfondo il gruppo delle Iadi, una porzione di cielo particolarmente luminosa.

Durante le eclissi, la luce solare, normalmente molto più intensa di quella stellare, è oscurata dalla Luna. Ciò rende possibile osservare e misurare la posizione delle stelle la cui luce è rasente al bordo solare, operazione impossibile quando la luce del Sole impedisce questo tipo di osservazioni. Secondo la teoria, la posizione (apparente) delle stelle osservate durante l'eclissi sarebbe dovuta risultare diversa da quella conosciuta, perché la deformazione dello spaziotempo prodotta dalla massa del Sole curva la traiettoria della luce stellare (vd. Asimmetrie n. 12, fig. b a p. 50). Eddington e Crommelin incontrarono però notevoli difficoltà. Sull'Isola di Principe il cielo fu nuvoloso con un'unica schiarita durante l'osservazione, a Sobral le variazioni di temperatura compromisero il funzionamento della strumentazione e il gruppo di Crommelin dovette ricorrere a un piccolo telescopio di riserva che si rivelò però fondamentale. Entrambi ottennero delle fotografie in cui erano chiaramente visibili circa una decina di stelle vicine al bordo solare. Il confronto tra le fotografie diurne e quelle realizzate di notte indicava che durante l'eclisse la posizione apparente delle stelle era effettivamente diversa. L'entità dello spostamento angolare rilevato da Eddington e Crommelin, una misura difficilissima e di precisione estrema, concordava con il valore dell'effetto previsto da Einstein: mezzo millesimo di grado. Queste osservazioni, realizzate in condizioni difficili e in luoghi remoti, fornirono la prima evidenza diretta della curvatura dello spaziotempo e confermarono le previsioni della teoria della relatività generale. I risultati furono annunciati a Londra il 6 novembre 1919 in una seduta congiunta della Royal Society e della Royal Astronomical Society e fecero il giro del mondo rimbalzando dalla comunità scientifica ai media molto velocemente. Il nuovo modello dello spazio e del tempo era un fatto e Einstein un genio riconosciuto in tutto il mondo e con una insospettabile carriera da icona irriverente davanti a sé.



b.
Nel corso del IX secolo alcune foto di Albert Einstein sono diventate delle vere e proprie icone.

[as] approfondimento

Mission impossible

Le imprese del 1919 diedero la prima conferma sperimentale della teoria di Einstein, ma non furono la prima missione scientifica ideata a tale scopo. Un gruppo di scienziati tedeschi guidati dall'astronomo Erwin Freundlich, grande amico di Einstein, partì da Berlino nel luglio del 1914 con l'obiettivo di giungere in Crimea per osservare l'eclissi di Sole del 21 agosto di quell'anno. L'idea della spedizione fu dello stesso Einstein, che nel 1913 propose a Freundlich di misurare la posizione delle stelle durante un'eclissi, progetto su cui si rivelò

estremamente insistente al punto che entrambi sottovalutarono gli eventi politici in corso e i loro potenziali sviluppi. Freundlich e i suoi, difatti, non raggiunsero mai la Crimea e vennero invece arrestati dai soldati russi, dato che la Russia e la Germania nel frattempo erano divenute nemiche. Era scoppiata la prima Guerra Mondiale. Fortunatamente gli scienziati furono scambiati con dei prigionieri russi e poterono tornare in patria. Guardando retrospettivamente, il fallimento di questa prima spedizione conteneva in sé una fortuna. Nel 1914 la teoria della relatività generale non era ancora matura e i calcoli elaborati da Einstein, che non aveva ancora intuito che lo spazio è curvo, contenevano un errore che avrebbe comportato delle discrepanze tra la teoria della relatività generale e le osservazioni sperimentali che dovevano confermarla. L'anno successivo Einstein rivide la teoria e propose un'equazione oggi nota come *equazione di campo di Einstein*, che descrive la gravità come curvatura dello spaziotempo.

[as] riflessi

Voci dal profondo.

di Antonella Varaschin



a.

Un capodoglio nel Mar Mediterraneo. Il suono dei capodogli è stato registrato dal Cibra nel 2005, nell'ambito della collaborazione con il progetto Nemo, e anche di recente nell'ambito del progetto Km3net. Il Cibra si è affermato in Italia e soprattutto all'estero su temi di ricerca legati all'acustica subacquea e allo studio dei mammiferi marini, e vari temi sono disponibili per tesi di laurea e di dottorato.

Lo sciabordio delle onde sulla battigia o contro gli scogli. O sulla chiglia di una barca ormeggiata. Suoni naturali, suoni dovuti alla presenza dell'uomo, in ogni caso suoni che possiamo sentire a "orecchio nudo". Ma mille altri sono i suoni del mare che noi non possiamo sentire, se non con l'ausilio di strumenti adeguati. Studiare tutti questi rumori e la loro variazione nel tempo è utilissimo ai ricercatori per conoscere l'ambiente marino e valutarne l'evoluzione e lo stato di salute. Di questo si occupa la *bioacustica*: monitorare, registrare, analizzare i rumori del mare. Uno degli antesignani in Italia di queste ricerche è Gianni Pavan, direttore del Centro Interdisciplinare di Bioacustica e Ricerche Ambientali (Cibra) dell'Università di Pavia. "Ho iniziato a occuparmi di bioacustica negli anni '80 e negli anni '90 – incomincia il suo racconto Pavan – quando questo approccio allo studio delle balene era ancora pionieristico. Oggi, invece, ricercatori dell'Infn, dell'Ingv (Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia), del Cibra e di alcune università effettuano il monitoraggio dei rumori del mare, installando microfoni sottomarini (idrofoni) a grandissima profondità". Tutto ha inizio nel 2005 quando le prime strutture del rivelatore Nemo, l'osservatorio sottomarino per i neutrini

dell'Infn (il precursore di Km3net), equipaggiate con idrofoni, furono calate in mare al largo di Catania e ancorate a 2000 metri di profondità. "Allora la preoccupazione principale – spiega Pavan – era che le strutture installate in fondo al mare non avessero un impatto negativo sulle popolazioni di delfini e capodogli, ma anche che i cetacei potessero interferire con le ricerche di fisica". Furono perciò organizzati alcuni incontri per discutere questi aspetti e Pavan fu invitato a presentare il punto di vista della biologia. Nacque allora l'idea di una collaborazione tra diverse aree di ricerca, dalla fisica delle astroparticelle alla bioacustica, dalla biologia marina alla geofisica, visto che anche l'Ingv aveva installato i suoi rilevatori sismici sulla stessa infrastruttura marina. E i primi risultati non si fecero attendere molto. Gli studi portarono una buona notizia: la popolazione di capodogli nel Mediterraneo era molto più numerosa di quanto ci si aspettasse! "La notizia in poche ore fece il giro del mondo e la bioacustica si rivelò così anche un buon argomento da comunicare!", commenta con ironia Pavan. Successivamente, nel 2009 un articolo sulla prestigiosa rivista *Nature* consacrò queste ricerche a livello scientifico.

“Riguardo alle ricerche attuali – continua a raccontare Pavan – posso dire con soddisfazione che da luglio 2012 è operativa una nuova piattaforma di ascolto di fronte a Catania, equipaggiata anche con sensori geofisici e acustici a bassa frequenza, utili per il rilevamento delle balenottere, e che il 24 marzo scorso è stata installata una torre dell’esperimento per neutrini, che ora ha preso il nome di Km3net. Su questa torre, grazie al progetto Futuro in Ricerca-Smo, sono stati collocati 14 idrofoni che, dal momento della loro installazione a 3500 metri di profondità, trasmettono incessantemente dati a terra e fin da subito hanno sentito nuovamente i suoni dei capodogli. Installare idrofoni a profondità così grandi – prosegue Pavan – permette di approfondire quale sia l’impatto dell’uomo sull’ambiente marino. Faccio un esempio: le balenottere comunicano tra loro anche a centinaia di chilometri di distanza con suoni che viaggiano a basse frequenze. Le stesse dei rumori prodotti dal traffico navale. Ora, a causa di questo disturbo, noi non riusciamo più a sentire le balenottere come prima. È chiaro che lo stesso vale anche per loro. Quindi, usufruire

delle infrastrutture di ricerca della fisica per noi è stato fondamentale perché, nonostante io ritenga che la biologia debba finanziarsi da sé, non può contare sulle stesse risorse della fisica delle particelle, perché diverse sono le esigenze: i fisici particellari allestiscono grandi e sofisticati esperimenti frutto di collaborazioni internazionali, la biologia invece conserva ancora un carattere locale legato a piccoli gruppi”.

“Per quanto riguarda il futuro – conclude Pavan – vorremmo creare una rete di sensori nel Mediterraneo. Oltre all’infrastruttura in Sicilia, ce ne sono altre due: nel Mar Ligure (una boa del Cnr, che potrebbe essere utilizzata per installare sensori acustici, ndr) e al largo di Tolone (l’esperimento Antares, sempre per lo studio dei neutrini, ndr), ma ce ne vorrebbe una nell’Adriatico. Dopodiché l’unica difficoltà da gestire sarebbe l’analisi della gran mole di dati, considerate le nostre risorse limitate: siamo infatti una decina in tutto a lavorarci. Nonostante questo, riuscire a creare questa rete darebbe a noi biologi la possibilità di capire la complessità dei movimenti degli animali, come reagiscono alle stagioni, alle attività umane e chissà quanto altro”.

b.
Gianni Pavan, direttore del Cibra. Assieme a Infn, Università Sapienza di Roma, Università di Roma 3, Ingv, il Cibra fa parte della collaborazione Smo (Submarine Multidisciplinary Observatory). Dal 2000 è impegnato nel progetto Nemo (oggi Km3net) e attualmente anche nel nuovo progetto Lido per il monitoraggio acustico dell’ambiente subacqueo con piattaforme cablate in fibra ottica.



[as] traiettorie

Il fisico che viene dal mare.

di Vincenzo Napolano

Il primo laboratorio in cui Simone Russo ha cominciato il suo lavoro di fisico è stato il mare della Sicilia. Studente all'ultimo anno di fisica a Catania, si imbarca nelle missioni scientifiche che studiavano il sito marino a largo di Capo Passero, in cui oggi è stata calata la prima torre del grande rivelatore di neutrini Km3net, a 3500 metri di profondità. Lì, quando l'acqua del mare cattura qualcuno dei miliardi di neutrini che la attraversano, si accendono i lampi di luce flebilissima, che solo gli "occhi" del rivelatore riescono a vedere. E gli occhi di Km3net guardano tanto più lontano, quanto più trasparente è l'acqua del mare. Il compito di Simone a bordo delle spedizioni dei Laboratori Nazionali del Sud dell'Infn è stato proprio quello di misurare la trasparenza dell'acqua a grandi profondità.



a.
Simone Russo ha iniziato la sua carriera nei Laboratori del Sud con il progetto Km3net e lavora oggi come ricercatore del Joint Research Centre sul Lago Maggiore.

[as] Il tuo primo laboratorio dunque era in mezzo al mare?

Simone [S]: In un certo senso sì. Sulle imbarcazioni facevamo le misure per determinare le proprietà delle acque in diversi siti profondi del Mar Mediterraneo. Il parametro più importante per noi era l'attenuazione della luce "in situ", che misuravamo con rivelatori fatti per lavorare ad altissima profondità, in collaborazione con biologi e oceanografi, intercalibrando le nostre misure. È stato il mio primo lavoro di ricerca e ha lasciato un *imprinting* indelebile sulla mia passione per la fisica e anche su quella per il mare. Non a caso dopo ho continuato a tenerle assieme molto a lungo.

[as] Poco dopo la laurea però hai deciso di abbandonare la ricerca per dedicarti a un lavoro "vero"...

[S]: Per un anno e mezzo ho lavorato all'acquisizione di immagini dei fondali marini a largo delle coste egiziane, per un'azienda che costruisce i tubi che collegano le piattaforme per l'estrazione del gas naturale e in cui viene pompato il gas stesso. Significava stare intere settimane lontani da terra, a contatto con un vero equipaggio di marinai, con turni di lavoro e ritmi massacranti, anche dal punto di vista fisico. Qui però ho imparato a far fruttare le conoscenze e la *forma mentis* acquisite con lo studio e la ricerca, per ottimizzare risultati e tempo di un processo di lavoro molto rigido. Credo sia stata un'esperienza decisiva per la mia vita.

[as] Dopo la quale sei tornato alla ricerca.

[S]: Sì. Però ho invertito i termini del binomio fisica e mare: questa volta ho usato la fisica per studiare il mare. Collaborando principalmente con un gruppo di ricerca dell'ex- Icram (oggi divenuto Ispra), mi sono occupato di analisi dei dati del monitoraggio delle acque e di modelli matematici di alcuni fenomeni marini, come l'*eutrofizzazione*.

[as] Ovvero?

[S]: Gli scarichi che derivano dall'allevamento degli animali, dall'agricoltura e dalle nostre città generano in mare un accumulo di sostanze organiche e la formazione di alghe, che sono prodotte più rapidamente di quanto il sistema riesca a degradarle. Questo fenomeno è l'*eutrofizzazione* e provoca in alcuni casi morie di pesci e stati di sofferenza degli

organismi del fondale marino. Può essere studiato e interpretato con modelli matematici rigorosi, che aiutano a prenderci cura del nostro mare, avendo a disposizione i dati di un monitoraggio continuo e omogeneo delle acque.

[as] Che in Italia però non riusciamo a fare dappertutto.

[S]: Purtroppo non ancora. Anche per questo durante il dottorato ho aggiustato il tiro della mia ricerca e mi sono occupato di un altro aspetto: la ricostruzione della storia dell'ambiente marino in epoche passate, a partire dall'analisi geochimica di coralli sottomarini. L'idea di riprodurre con dei modelli matematici l'evoluzione dell'ambiente marino mi ha sempre affascinato e la modellizzazione di sistemi complessi e fenomeni estremi è divenuto il cuore dei miei interessi. In seguito ho allargato ulteriormente il mio orizzonte, ma la prospettiva è rimasta la stessa.

[as] Dallo studio del mare del passato a quello del futuro del nostro pianeta...

[S]: Da qualche anno mi occupo di sviluppare e applicare a situazioni locali i modelli che cercano di predire l'evoluzione del clima globale. Si tratta di provare a catturare il comportamento di sistemi fisici, caratterizzati da un'evoluzione caotica e dall'interazione di moltissime variabili. È chiaro che le predizioni che proviamo a formulare hanno grandi implicazioni sociali ed economiche. Dal punto di vista di chi, come me, si confronta quotidianamente con i modelli matematici, si tratta di una sfida intellettuale entusiasmante, che motiva e gratifica profondamente.

[as] Oggi sei un ricercatore dell'Ispra, distaccato presso lo Joint Research Centre della Commissione Europea. La tua traiettoria di fisico è stata molto singolare: sei approdato a uno dei temi teorici più *hard*, partendo da misure sperimentali in mare. Ti ha aiutato stare in Italia?

[S]: L'Italia non è un posto facile per chi vuole fare ricerca. E io ho lavorato anche all'estero, in Olanda e Francia, per poi tornare all'Ispra qualche anno fa. Per muovermi nel mondo accademico spesso ho dovuto dribblare ostacoli non propriamente scientifici e probabilmente questo ha influenzato la mia traiettoria... La cosa più importante, però, credo sia non spegnere mai il cervello e continuare a cercare le persone e le situazioni più stimolanti. Anche perché oggi nessuno fa ricerca da solo.

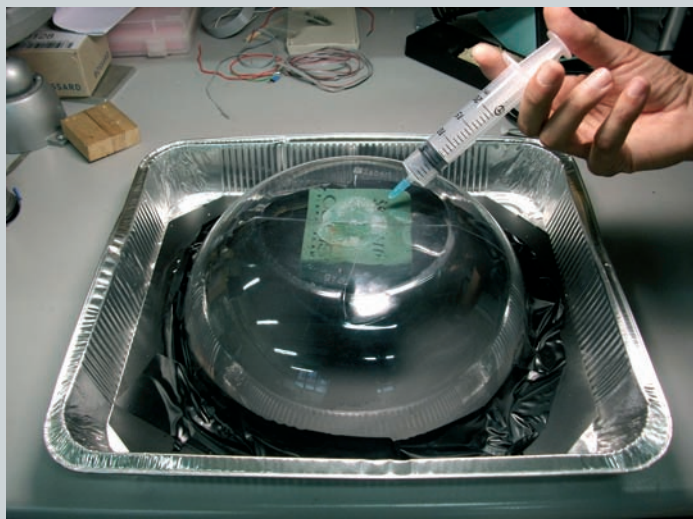
[as] illuminazioni

Particelle nella nebbia.

Al termine di ogni lezione gli studenti mi fanno sempre la stessa domanda: “Come si possono vedere le particelle?”. Sembra strano, ma per riuscire a “vederle”, basta entrare in un negozio di casalinghi! Qui, infatti, è possibile trovare buona parte del materiale necessario per costruire una *camera a nebbia*: uno strumento che permette di rivelare le tracce dei raggi cosmici, che continuamente “piovono” sulla Terra, provenienti dalle regioni più remote dell’universo. Una camera a nebbia non è altro che una scatola ben chiusa, contenente vapore di alcool sovra-saturo, tanto concentrato da essere pronto a condensarsi non appena interviene qualcosa a cambiare le sue condizioni. Ecco perché quando il rivelatore è attraversato dalle particelle cosmiche, che sono elettricamente cariche, il vapore di alcool condensa in minutissime goccioline. La traccia delle particelle diventa così subito visibile sotto forma di una lunga e sottile nuvoletta bianca, che si dissolve nel giro di uno, due secondi. Costruire una camera a nebbia non è difficile ed è poco costoso (per una descrizione dettagliata, vd. www.asimmetrie.it). Servono un contenitore molto trasparente, due vassoi d’alluminio e un mattoncino di spugna per fioristi, che servirà da serbatoio per l’alcool, necessario a creare il vapore all’interno dello strumento. Un po’ più di attenzione andrà messa nella ricerca dell’alcool isopropilico: si tratta di un alcool particolare, capace di evaporare in pochissimo tempo creando nella camera le condizioni di sovra saturazione che ci servono. Io l’ho comprato da un restauratore di mobili, ma si può trovare da diversi rivenditori.

Quando avrete tutto il materiale, la spugna per fioristi andrà incollata con del silicone al fondo della ciotola e con del nastro isolante si sigillerà l’imboccatura della ciotola con un disco ritagliato da uno dei due vassoi. Uno o due piccoli fori sul fondo della ciotola, in corrispondenza della spugna, serviranno per introdurre l’alcool con una siringa. Per favorire la condensazione dei vapori di alcool che si liberano dalla spugna e riempiono il volume della camera, si può disporre la ciotola, capovolta, sopra uno strato di ghiaccio secco versato nel secondo vassoio. Dopo pochi minuti, picchiando delicatamente in corrispondenza della spugna, sarà possibile far cadere qualche goccia di alcool, che a contatto con il fondo freddo dovrebbe formare una bella nuvola bianca ad anello, che si allarga e scompare rapidamente: significa che la camera a nebbia è pronta ed è ora di spegnere la luce della stanza!

Illuminate la camera solo di lato con una lampada da tavolo, disponendo un fondo nero dalla parte opposta rispetto a quella dalla quale si guarda, e osservate. Le tracce non sono rare: se ne vedono circa una ogni minuto. Alcune tra queste sono davvero spettacolari! Se non riuscite a vedere proprio nulla, non vi scoraggiate: potreste avere messo troppo poco alcool, mentre una sottile pioggerellina all’interno della camera sarà segno che ne avete messo troppo. E se fuori sta piovendo, rimandate l’esperimento a una bella giornata di sole, quando l’ambiente sarà più secco. [Giovanni Organtini]



Le fasi di costruzione della camera a nebbia, visualizzabili anche in un video, sono descritte in dettaglio sul sito di Asimmetrie al link <http://www.asimmetrie.it/index.php/particelle-nella-nebbia>. Troverete anche alcune immagini dei materiali e del montaggio e qualche consiglio per un risultato sicuro.

a.
Una delle fasi di realizzazione della camera a nebbia: l’iniezione dell’alcool nella camera.

**I laboratori dell'Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.**

I laboratori organizzano, su richiesta
e previo appuntamento, visite gratuite
per scuole e vasto pubblico.

La visita, della durata di tre ore circa,
prevede un seminario introduttivo
sulle attività dell'Infn e del laboratorio
e una visita alle attività sperimentali.



Per contattare
i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)
T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 8068547
schiavon@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)
T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it



www.infn.it

rivista online
www.asimmetrie.it